بسم الله الرحمن الرحیم

فیزیک(۳) و آزمایشگاه

سال سوم آموزش متوسّطه

رشتهٔ ریاضی و فیزیک

۱۳۹۱

وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

برنامه‌ریزی محتوا و نظارت بر تألیف : **دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های درسی**

نام کتاب : **فیزیک (۳) و آزمایشگاه ـ ۲۵۶/۴**

شورای برنامه‌ریزی و تألیف : **احمد احمدی، اعظم پورقاضی، روح‌اللّه خلیلی‌بروجنی، ابوالقاسم زال‌پور، سیّدمهدی شیوایی، شیرین فراهانی، حسن عزیزی، غلامعلی محمودزاده** و **منصور وصالی**

آماده‌سازی و نظارت بر چاپ و توزیع : **ادارهٔ کلّ چاپ و توزیع کتاب‌های درسی**

تهران: خیابان ایرانشهر شمالی ـ ساختمان شمارهٔ ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)

تلفن: ۹ـ۸۸۸۳۱۱۶۱، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کدپستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹،

وب‌سایت : www.chap.sch.ir

رسام : **هدیه بندار**

صفحه‌آرا : **فائزه محسن‌شیرازی**

طراح جلد : **علیرضا رضائی‌کُر**

ناشر : **شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران: تهران ـ کیلومتر ۱۷ جادّهٔ مخصوص کرج ـ خیابان ۶۱ (داروپخش)**

تلفن: ۵ ـ ۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۱۳۹ـ۳۷۵۱۵

چاپخانه : **شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»**

سال انتشار و نوبت‌چاپ : **چاپ دوازدهم ۱۳۹۱**

ISBN 964-05-0991-4 شابک ۴-۰۹۹۱-۰۵-۹۶۴



هر کاری را که انسان باورش این است که نسبت به آن کار ضعیف است،نمی‌تواند آن کار را انجام بدهد. ...هر کشوری که اعتقادش این باشد که نمی‌تواند خودش صنعتی را ایجاد کند این ملت محکوم به این است که تا آخر نتواند، و این اساس نقشه‌هایی بوده است که برای ملل ضعیف دنیا قدرت‌های بزرگ کشیده‌اند.

امام خمینی

فهرست

پیشگفتار

در قرن بیست‌ویکم بشر وارد دوره‌ی جدیدی از توسعه‌ی علم و فناوری شده است. حجم اطلاعات علمی بشر طبق تخمین دانشمندان در چند سال آینده در هر چند ماه دو برابر می‌شود. شیوه‌های زندگی نیز به دنبال این تحولات در علم و تکنولوژی خیلی سریع تغییر می‌کنند. بنابراین نیازهای فردایِ دانش‌آموزانِ امروز برای ما خیلی آشکار نیست. به دنبال این تحولات شیوه‌های آموزش علوم (فیزیک) به تبع نیازهای مجهول آینده فرزندانمان تغییر چشمگیری در جهان داشته است. در این شیوه‌ها تلاش زیادی می‌شود تا دانش‌آموز «چگونگی آموختن» را بیاموزد و مهارت برخورد با مطلب یا مسئله جدید و طی مراحلی که منجر به حل آن مسئله می‌شود را فرا گیرد.

کتاب فیزیک (۳) و آزمایشگاه براساس روش فعال تألیف شده است. یعنی دانش‌آموز در ساخت مفاهیم نقش دارد و نقش دبیران محترم، طرح مسئله و سپس راهنمایی دانش‌آموزان برای رسیدن به حل مسئله است. در این کتاب سعی شده سه هدف نگرشی، دانشی و مهارتی مورد توجه کامل قرار گیرد و حجم و تعداد مفاهیم با توجه به اختصاصی‌بودن درس برای دانش‌آموزان رشته علوم ریاضی و تجربی انتخاب شده است.

انتظار می‌رود همکاران گرامی با تکیه بر تجربه و توانایی‌های خود، فعالیت یا آزمایشی را که در یادگیری می‌تواند کمک کند طراحی کرده و دانش‌آموزان را بر انجام آن‌ها ترغیب کنند و از آنان بخواهند که نتایج آن فعالیت‌ها را در دفتر گزارش کار خود ثبت کنند. این دفتر و عملکرد دانش‌آموزان در حین انجام فعالیت می‌تواند به‌عنوان یکی از ملاک‌های ارزشیابی مورد توجه

قرار گیرد. لازم به تذکر است که عناوین و مباحث این کتاب براساس سن دانش‌آموزان و زمان تخصیص داده به این درس تدارک دیده شده است و همکاران محترم بایستی از پیرایه‌های اضافی به این مباحث، بپرهیزند.

گروه فیزیک دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتب درسی همواره از دریافت نظرهای ارزشمند دبیران محترم، صاحب‌نظران و دانش‌آموزان جهت رفع نارسایی‌ها و لغزش‌های احتمالی به‌گرمی استقبال می‌کنند. نظرهای اصلاحی خود را به نشانی تهران ــ صندوق پستی ۱۵۸۵۵/۳۶۳ ــ گروه فیزیک و یا نشانی الکترونیک physics-dept@talif.sch.ir ارسال نمایید.

گروه فیزیک دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتب درسی

http://physics-dept.talif.sch.ir

۱



نیروگاه شهید سلیمی نکا

نیروگاه شهید سلیمی نکا واقع در استان مازندران از بزرگ‌ترین نیروگاه‌های حرارتی در خاورمیانه است که به منظور تأمین بخش قابل توجهی از برق کشور، طراحی و نصب گردیده است. ظرفیت اسمی نیروگاه جمعاً ۲۰۳۵ مگاوات است. قسمت‌های اصلی نیروگاه عبارتند از: دیگ بخار، ساختمان میانی، سالن توربین، مبدل‌ها و ساختمان‌های کمکی.

سوخت اصلی نیروگاه، گاز طبیعی و سوخت دوّم آن نفت کوره یا مازوت است.

فصل ۱

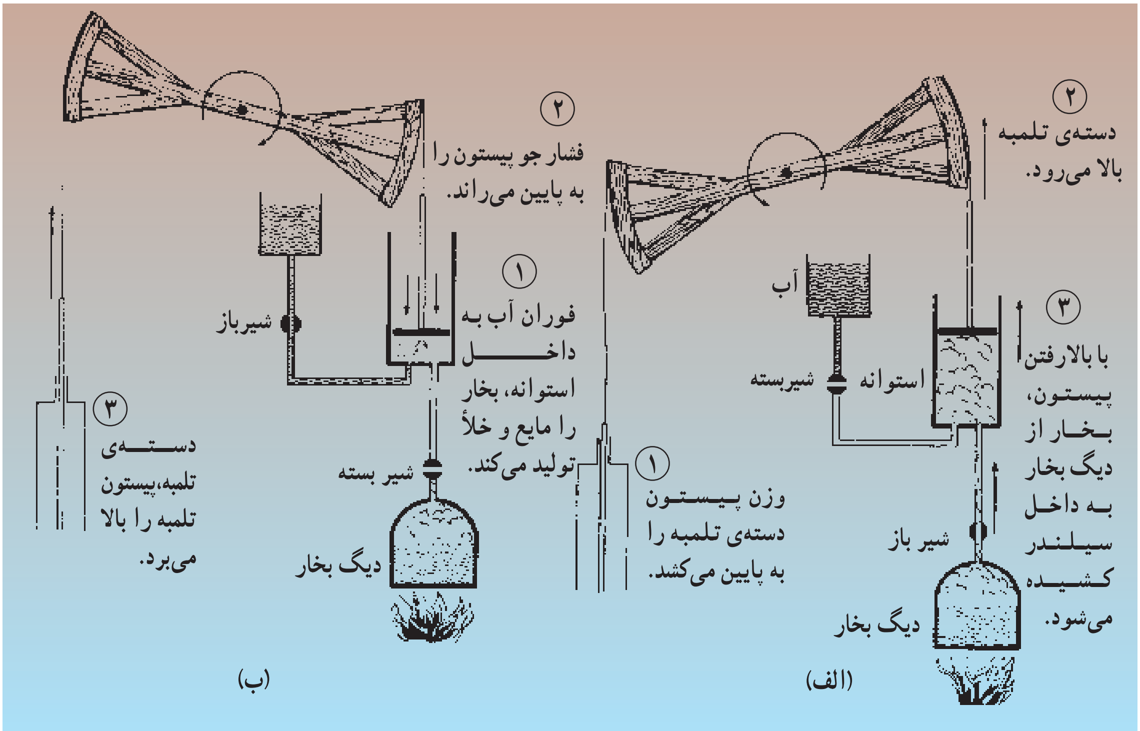
ترمودینامیک

در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که انواع مختلف انرژی می‌توانند به یک‌دیگر تبدیل شوند، هنگامی که جسمی روی سطح حرکت می‌کند، مقداری از انرژی جنبشی آن به انرژی درونی جسم و سطح تبدیل می‌شود، یا وقتی ظرف آبی را در مقابل نور آفتاب قرار می‌دهیم، ظرف و آب گرم‌تر می‌شوند. در این حالت، بخشی از انرژی نورانی به انرژی درونی ظرف و آب تبدیل می‌شود. برخی از این تبدیل‌ها خودبه‌خود رخ می‌دهند ولی برای وقوع تبدیل‌های دیگر، دستگاه‌هایی طراحی و ساخته شده‌اند؛ مثلاً در گذشته، برای ایجاد روشنایی از تبدیل انرژی شیمیایی موجود در شمع یا نفت به انرژی نورانی استفاده می‌شد ولی بعدها که انسان به انرژی الکتریکی دست یافت، لامپ را اختراع کرد که انرژی الکتریکی را به انرژی نورانی تبدیل می‌کند. موتورهای الکتریکی که در وسایل خانگی نظیر جاروبرقی، پنکه، یخچال و ... به‌کار می‌روند، برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی طراحی و ساخته شده‌اند. در فصل ۴ در مورد این موتورها صحبت خواهیم کرد.

در این فصل به بررسی وسایلی می‌پردازیم که گرما را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. این وسیله‌ها **ماشین گرمایی** نامیده می‌شوند. در شکل ۱ــ۱ طرح یکی از اولین ماشین‌های گرمایی (ماشین نیوکامن) نشان داده شده است. در این ماشین، گرمایی که به دیگ بخار داده می‌شود برای به‌کارانداختن یک تلمبه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در شکل ۱ ــ۱ الف در اثر وزن پیستون دسته‌ی تلمبه به‌طرف پایین حرکت می‌کند و بخار آب وارد استوانه می‌شود. با باز شدن شیر در شکل ۱ ــ۱ ب، آب به داخل استوانه فوران می‌کند که درنتیجه‌ی آن مقداری از بخار، مایع می‌شود و فشار گاز در داخل استوانه کاهش می‌یابد. سپس فشار هوا پیستون را به طرف پایین می‌راند و دسته‌ی دیگر تلمبه به‌طرف بالا کشیده می‌شود. بدین ترتیب، حرکت تلمبه ادامه می‌یابد.

ماشین‌های گرمایی در طول زمان کامل‌تر شده‌اند و امروزه ما با انواع پیشرفته‌ی آن‌ها سر و کار داریم. برای آشنایی با طرز کار این ماشین‌ها و این که از چه قانون‌هایی پیروی می‌کنند، لازم است با علم **ترمودینامیک** آشنا شویم.



شکل ۱ــ۱ــ ماشین نیوکامن

در فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که در مایع‌ها و گازها، مولکول‌ها آزادانه به اطراف حرکت و با یک‌دیگر برخورد می‌کنند و مکان و سرعت آن‌ها پیوسته در حال تغییر است. اکنون ممکن است این سؤال مطرح شود که *برای درک رفتار یک گاز یا مایع، آیا لازم است از چگونگی حرکت تک تک مولکول‌ها اطلاع داشته باشیم؟*

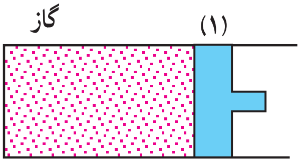
بررسی‌های تجربی و نظری نشان داده‌اند که رفتار ماده را می‌توان برحسب کمیت‌هایی چون فشار، دما، گرما، گرمای ویژه و... توضیح داد. این کمیت‌ها به وضعیّت مادّه در مقیاس بزرگ بستگی دارند و به **جزییات رفتار تک تک مولکول‌ها** وابسته نیستند. این موضوع را می‌توان در این مثال مشاهده کرد که دمای یک لیوان آب که در اتاق به تعادل گرمایی رسیده است، ثابت می‌ماند؛ در حالی که مولکول‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن پیوسته به اطراف حرکت می‌کنند و سرعتشان تغییر می‌کند. کمیت‌هایی که وضعیت ماده را در مقیاس بزرگ توصیف می‌کنند، **کمیت‌های ماکروسکوپیک** نامیده می‌شوند. علم ترمودینامیک رفتار ماده را برحسب این کمیت‌ها توصیف می‌کند؛ برای مثال، در فیزیک ۲ دیدیم که اگر به جسمی به جرم m و گرمای ویژه‌ی c مقدار Q گرما بدهیم، دمای آن به

اندازه‌ی $\Delta T = \frac{Q}{mc}$ افزایش می‌یابد. در این مثال ما برای توضیح دادن چگونگی رفتار جسم از کمیت‌های ماکروسکوپیک دما، گرما و گرمای ویژه استفاده کرده‌ایم ؛ یعنی علم ترمودینامیک را برای این منظور به‌کار برده‌ایم.

در این فصل، به بررسی و توصیف قانون‌های ترمودینامیک و کاربرد آن‌ها در ماشین‌های گرمایی می‌پردازیم. به‌همین منظور، تحولات ماده‌ی خاصی را که معمولاً به‌صورت گاز یا مایع است، در نظر می‌گیریم. این ماده را **دستگاه** می‌نامیم. آن‌چه در اطراف دستگاه قرار دارد و می‌تواند با آن تبادل انرژی داشته باشد، **محیط** نامیده می‌شود.

۱ــ۱ــ معادله‌ی حالت

مقدار معینی گاز را مطابق شکل ۱ــ۲ در داخل یک استوانه در نظر بگیرید که با پیستونی مسدود شده است. پیستون می‌تواند در درون استوانه حرکت کند (در این‌جا دستگاه مورد بررسی گازاست). اگر پیستون برای مدتی طولانی در وضعیت (۱) (با حجم V_1) قرار داشته باشد، دما و فشار آن در همه‌ی نقاط گاز یکسان (مثلاً برابر T_1 و P_1) خواهد بود. در این صورت، می‌گوییم که گاز در حالت **تعادل** است.



شکل ۱ــ۲

فعالیت ۱ــ۱

اگر دما و فشار در داخل گاز در شکل ۱ــ۲ در نقاط مختلف متفاوت باشند، چه رخ می‌دهد؟ این پرسش را در کلاس به بحث بگذارید.

درحالت تعادل هر یک از کمیت‌های فشار، دما و حجم گاز مقدار مشخصی دارد ؛ مثلاً، هنگامی که گاز درون استوانه در شکل ۱ــ۲ در وضعیت (۱) قرار دارد، مقدار این کمیت ها به‌ترتیب برابر با P_1 ، T_1 و V_1 است. حال اگر گاز را گرم کنیم یا پیستون را به‌طرف راست یا چپ جابه‌جا

کنیم، مقدار بعضی از این کمیت‌ها (یا همه‌ی آن‌ها) تغییر خواهد کرد و اگر مدتی نسبتاً طولانی صبر کنیم، این کمیت‌ها مقدارهای مشخص دیگری چون $P_۲$ ، $T_۲$ و $V_۲$ را اختیار خواهند کرد. از این کمیت‌ها برای توصیف حالت دستگاه می‌توان استفاده کرد و گفت که دستگاه در ابتدا در حالتی بود که کمیت‌های فشار، دما و حجم به ترتیب مقدارهای $P_۱$ ، $T_۱$ و $V_۱$ را داشتند. سپس در اثر گرم‌شدن یا جابه‌جایی پیستون، دستگاه به‌حالتی تحول یافت که در آن این کمیت‌ها مقادیر $P_۲$ ، $T_۲$ و $V_۲$ را اختیار کردند. این کمیت‌های ماکروسکوپیک که حالت دستگاه را می‌توان برحسب آن‌ها توصیف کرد، **متغیّرهای ترمودینامیکی** نامیده می‌شوند. متغیرهای ترمودینامیکی از یک‌دیگر مستقل نیستند و با هم رابطه دارند ؛ مثلاً، اگر در شکل ۱ــ۲ با ثابت نگه‌داشتن پیستون (یعنی، در حجم ثابت) گاز را تا دمای معینی گرم کنیم، فشار آن تغییر خواهد کرد و مقدار متفاوتی خواهد داشت. حال اگر بخواهیم این مقدار فشار باز هم تغییر کند، باید دما یا حجم یا هر دو را تغییر دهیم.

رابطه‌ی بین متغیرهای ترمودینامیکی **معادله‌ی حالت** نامیده می‌شود. معادله‌ی حالت یک دستگاه در حالت کلی بسیار پیچیده است ولی آزمایش نشان می‌دهد هنگامی که گازها بسیار رقیق‌اند، معادله‌ی حالت آن‌ها ساده و مستقل از نوع گاز است. در این حالت، گاز را **گاز کامل** می‌نامند.

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که برای مقدار معینی گاز کامل نسبت $\frac{PV}{T}$ مقدار ثابتی دارد. این مقدار ثابت به مقدار گاز بستگی دارد و مستقل از نوع گاز است. درنتیجه،

$$\frac{PV}{T} \propto n \qquad (۱ــ۱)$$

که در آن n مقدار گاز برحسب مول است که به‌صورت نسبت جرم گاز (m) به جرم مولکولی آن (M) تعریف می‌شود.

$$n = \frac{m}{M} \qquad (۱ــ۲)$$

تعداد مولکول‌های موجود در هر مول از یک ماده برابر با عدد آووگادرو است. ثابت تناسب در رابطه‌ی ۱ــ۱ **ثابت گازها** نامیده می‌شود و مقدار آن برابر است با $R = ۸/۳۱۴ J/mol.K$.

بنابراین، معادله‌ی حالت گاز کامل که کمیت‌های P، V و T را به یک‌دیگر مربوط می‌کند، به‌صورت زیر است :

$$PV = nRT \qquad (۱ــ۳)$$

مثال ۱ـ۱

تعیین کنید که در شرایط متعارفی (فشار یک آتمسفر، دمای صفر درجه سلسیوس) در اتاقی به ابعاد $۴m \times ۳m \times ۳m$ چند مول هوا وجود دارد؟

حل: حجم اتاق برابر با $۳۶m^۳$ است.

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{۱ \times ۱۰^۵ \times ۳۶}{۸/۳ \times ۲۷۳} = ۱۵۸۹ \quad mol$$

۱ــ۲ــ فرایندهای ترمودینامیکی

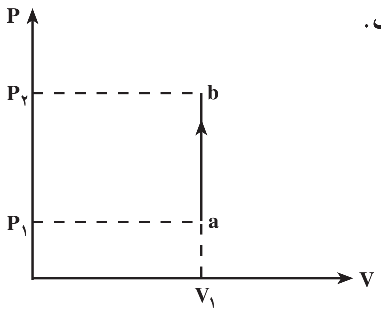
در بخش قبل دیدیم که حالت (تعادل) یک دستگاه را می‌توان برحسب متغیرهای ترمودینامیکی P، Vو T بیان کرد. هم‌چنین، در اثر گرم شدن گاز یا جابه‌جاشدن پیستون حالت گاز تغییر می‌کند و گاز به حالت دیگری می‌رود. هنگامی که دستگاه از یک حالت به حالت دیگر می‌رود، می‌گوییم که یک **فرایند ترمودینامیکی** انجام شده است.

برای مثال، در بخش قبل دیدیم که گاز ابتدا در حالت $P_۱$ ، $V_۱$ و $T_۱$ بود و در اثر گرم کردن آن با ثابت‌نگه‌داشتن حجم، گاز به‌حالت $P_۲$ ، $V_۱$ و $T_۲$ رسید. در این فرایند ترمودینامیکی حالت دستگاه در حجم ثابت از (a) با دمای $T_۱$ و فشار $P_۱$ به (b) با دمای $T_۲$ و فشار $P_۲$ تغییر کرده است.

فعالیت ۱ـ۲

چند فرایند ترمودینامیکی را که در اطراف شما رخ می‌دهد، ذکر کنید.

فرایندهای ترمودینامیکی را می‌توان در دستگاه مختصات P-V (که بر روی یک محور P و روی محور دیگر V مشخص می‌شود) و یا دستگاه V-T یا دستگاه P-T نمایش داد. نمودار P-Vی فرایند مثال بالا، در شکل ۱ــ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱ــ۳

تمرین ۱ــ۱

نمودار V-T را برای مثال بالا رسم کنید.

به همین طریق نیز می‌توان یک فرایند ترمودینامیکی انجام داد که در آن با جابه‌جاکردن پیستون گاز منبسط یا متراکم شود. در این فرایند نیز می‌توان نمودارهای مربوط را رسم کرد. در ادامه‌ی فصل با فرایندهای ترمودینامیکی مختلف آشنا می‌شویم.

لازم به تذکر است که ترمودینامیک فقط به بررسی وضعیت ماده در **حالت‌های تعادل** می‌پردازد؛ بنابراین، برای بررسی رفتار گاز با استفاده از این علم، باید فرایند (مثلاً گرم‌کردن یا جابه‌جاکردن پیستون) را آن‌قدر آهسته انجام دهیم که گاز در هر لحظه، به حالت تعادل بسیار نزدیک باشد و درنتیجه، متغیرهای ترمودینامیکی P, V و T گاز در حین فرایند در همه جا یکسان و مقدار مشخصی داشته باشند. در این صورت، با معلوم‌بودن متغیرهای ترمودینامیکی می‌توان همه‌ی مراحل فرایند را در نمودارهای مربوط نمایش داد.

۱ــ۳ــ تبادل انرژی

تبادل انرژی بین محیط و دستگاه از دو طریق **گرما** و **کار** صورت می‌گیرد.

الف ــ گرما: در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که گرما **انرژی‌ای است که به علت اختلاف دما بین دو جسم مبادله می‌شود.** به‌عبارت دیگر گرما، هنگامی بین محیط و دستگاه مبادله می‌شود که این دو با هم اختلاف دما داشته باشند. در این کتاب بنا به قرارداد گرمایی را که جسم (دستگاه) می‌گیرد، با علامت مثبت و گرمایی را که دستگاه از دست می‌دهد، با علامت منفی نشان داده‌ایم. در این فصل نیز این قرارداد را رعایت می‌کنیم.

هنگامی که دستگاه با محیط تبادل گرما می‌کند، معمولاً فرض می‌شود که با یک منبع گرما در تماس است. **منبع گرما، جسمی است که اگر گرما از دست بدهد یا بگیرد، دمای آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نکند؛** مثلاً، هوای اتاق را برای یک استکان چای داغ می‌توان منبع گرما درنظر گرفت. با سردشدن چای، دمای اتاق به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نمی‌کند.

پرسش ۱ــ۱

آیا از مخلوط آب و یخ می‌توان به عنوان منبع گرما استفاده کرد؟

ب ــ کار: در بخش قبل دیدیم که ممکن است در یک فرایند ترمودینامیکی، حجم گاز نیز تغییر کند و گاز متراکم یا منبسط شود ؛ مثلاً، برای متراکم‌کردن گاز داخل استوانه در شکل ۱ــ۲ باید به پیستون نیرو وارد و آن را به طرف چپ جابه‌جا کنیم. در این صورت، همان‌طور که در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه خواندیم، کار انجام داده‌ایم. در این مثال، می‌توان گفت که تبادل انرژی بین دستگاه و محیط از طریق کار صورت گرفته است.

فعالیت ۱ــ۳

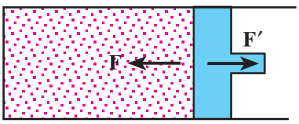
با انگشت خود انتهای یک سرنگ (یا تلمبه‌ی دوچرخه) را مسدود کنید و الف) سعی کنید گاز داخل آن را متراکم کنید ؛ ب) پیستون سرنگ را بکشید و سعی کنید گاز داخل آن‌را منبسط و سپس آن را رها کنید. مشاهدات خود را به کلاس گزارش دهید.

در فعالیت ۱ــ۳ در حالت الف گاز بر پیستون نیرو وارد می‌کند و ما برای متراکم‌کردن گاز باید حداقل نیرویی برابر با این نیرو به پیستون وارد کنیم. در حالت ب، پیستون پس از رهاشدن به وضعیت اولیه برمی‌گردد. در این حالت نیز گاز به پیستون نیرو وارد می‌کند ولی نیرویی که محیط (به‌علت فشار هوا) به پیستون وارد می‌کند، بیش‌تر است. در فعالیت ۱ــ۳ حضور دو نیرو را به ترتیب در بخش الف و ب تجربه می‌کنیم :

۱) نیروی F که محیط (که پیستون را نیز شامل می‌شود) به گاز وارد می‌کند ؛

۲) نیروی F' که گاز به محیط وارد می‌کند (شکل ۱ــ۴).

این دو نیرو کنش و واکنش‌اند و اندازه‌ی آن‌ها با یک‌دیگر برابر است. هنگامی که پیستون جابه‌جا می‌شود، هر دوی این نیروها کار انجام می‌دهند.



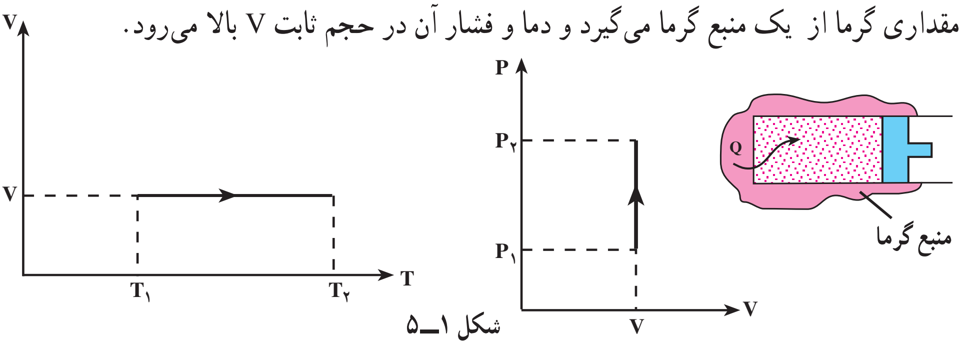
شکل ۱ــ۴

علامت کار این نیروها مخالف یک دیگر است ؛ مثلاً در فعالیت ۱ــ۳ الف کار محیط روی دستگاه مثبت و کار دستگاه بر روی محیط منفی است (چرا؟). کار محیط روی دستگاه را با W وکار دستگاه روی محیط را با W' نشان می‌دهیم. با توجه به مطالب گفته‌شده، $W = -W'$ است. در تراکم $W > 0$ و در انبساط $W < 0$ است.

۱ــ۴ــ فرایندهای خاص

در ترمودینامیک بین دو حالت مشخص (مثلاً حالت‌های a و b در شکل ۱ــ۳) فرایندهای متفاوتی می‌تواند رخ دهد. در بین این فرایندها، فرایندهای خاصی وجود دارند که کاربرد آن‌ها وسیع‌تر است ؛ از جمله : **فرایند هم حجم**، **فرایند هم فشار**، **فرایند هم دما** و **فرایند بی در رو**. در ادامه، به توصیف این فرایندها می‌پردازیم.

الف) فرایند هم‌حجم: حجم گاز در حین این فرایند ثابت نگه داشته می‌شود. در فرایند هم‌حجم، کار صفر است (چرا؟) و گاز فقط می‌تواند با محیط تبادل گرما کند. در شکل ۱ــ۵ نمودارهای P - V و V - T برای یک فرایند هم حجم نشان داده شده است. طی این فرایند، گاز مقداری گرما از یک منبع گرما می‌گیرد و دما و فشار آن در حجم ثابت V بالا می‌رود.



شکل ۱ــ۵

اگر در این مثال، گاز به‌صورت هم‌حجم گرما از دست بدهد، نمودارهای شکل ۱ــ۵ به چه صورت درمی‌آیند؟

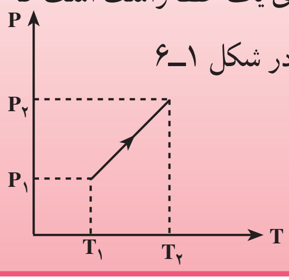
مثال ۱ــ۲

نمودار P-T فرایند شکل ۱ــ۵ را در صورتی که گاز کامل باشد، رسم کنید.

حل: چون گاز کامل است، با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۳ داریم :

$$P = \frac{nRT}{V}$$

از آن‌جا که $\frac{nR}{V}$ ثابت است، رابطه‌ی بالا معادله‌ی یک خط راست است که امتداد آن از مبدأ مختصات می‌گذرد. نمودار این معادله در شکل ۱ــ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۱ــ۶

اکنون به محاسبه‌ی گرمایی که در فرایند هم حجم به دستگاه داده می‌شود، می‌پردازیم.

در فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که گرمای لازم برای تغییر دمای یک جسم به اندازه‌ی ΔT با رابطه‌ی زیر داده می‌شود.

$$Q = mc\Delta T \qquad (۱_۴)$$

در این رابطه، m جرم جسم و c گرمای ویژه‌ی آن است. باید توجه داشت که در مورد گازها مقدار گرمای ویژه به نوع فرایند بستگی دارد. درنتیجه، در رابطه‌ی ۱ــ۴ باید گرمای ویژه‌ی مربوط به فرایند هم حجم را، که در زیر تعریف می‌شود، قرارداد.

گرمای ویژه‌ی یک گاز در حجم ثابت برابر است با مقدار گرمایی که در حجم ثابت به یکای جرم آن داده می‌شود تا دمای آن یک کلوین بالا رود. گرمای ویژه در حجم ثابت را با c_V نشان می‌دهیم ؛ بنابراین، رابطه‌ی ۱ــ۴ به‌صورت زیر درمی‌آید.

$$Q = mc_v\Delta T \qquad (۱_۵)$$

معمولاً مقدار گازها را برحسب مول بیان می‌کنند. درنتیجه، اگر با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۲ جرم گاز را برحسب مول قرار دهیم، خواهیم داشت :

$$Q = nMc_v\Delta T \qquad (۱_۶)$$

کمیت Mc_V را با C_{MV} نشان می‌دهند و آن‌را **ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت** می‌نامند. **C_{MV} مقدار گرمایی است که در حجم ثابت به یک مول از یک گاز داده می‌شود تا دمای آن یک کلوین بالا رود.** با استفاده از این کمیت، رابطه‌ی ۱ــ۶ به‌صورت زیر درمی‌آید.

$$Q = nC_{MV}\Delta T \qquad (۱_۷)$$

ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت چند گاز در ستون سوم جدول ۱ــ۱ آمده است.

با تقریب خوبی می‌توان نشان داد که ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت به جنس گاز بستگی ندارد و برای گازهای تک اتمی برابر با $\frac{3}{2}R$، برای گازهای دو اتمی برابر با $\frac{5}{2}R$ است.

مثال ۱ــ۳

به ۰/۲ مول از گازهای He ، O_2 و CO_2 ، در حجم ثابت، ۱۰۰ ژول گرما می‌دهیم ؛ دمای هریک چه‌قدر افزایش می‌یابد؟

حل: از رابطه‌ی ۱ــ۷ داریم :

$$\Delta T = \frac{Q}{nC_{MV}}$$

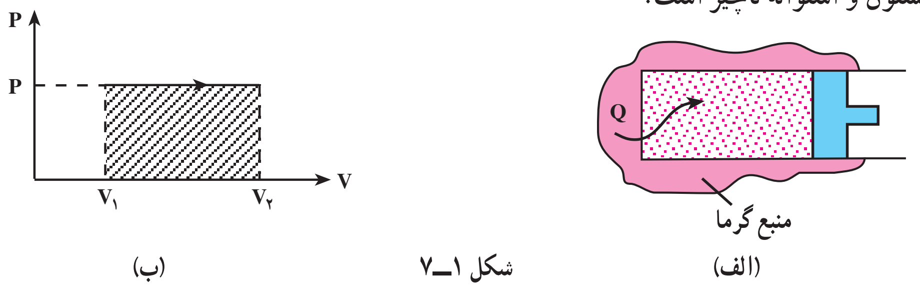
با استفاده از جدول ۱ــ۱ مقادیر C_{MV} را برای این گازها در رابطه‌ی بالا قرار می‌دهیم.

برای He ،
$$\Delta T = \frac{۱۰۰}{۰/۲(۱۲/۵)} = ۴۰K$$

برای O_2 ،
$$\Delta T = \frac{۱۰۰}{۰/۲(۲۱/۲)} = ۲۳/۶K$$

برای CO_2 ،
$$\Delta T = \frac{۱۰۰}{۰/۲(۲۸/۵)} = ۱۷/۵K$$

ب ــ فرایند هم‌فشار: فشار گاز در حین این فرایند ثابت می‌ماند. به‌عنوان مثالی از این فرایند، گازی را مطابق شکل ۱ــ۷ الف در داخل استوانه‌ای که با یک منبع گرما در تماس است در نظر بگیرید. گاز ابتدا در فشار P و حجم V_1 در حالت تعادل قرار دارد. فرض کنید اصطکاک بین پیستون و استوانه ناچیز است.



(الف) شکل ۱ــ۷ (ب)

در این صورت، فشار گاز با فشار محیط برابر است (چرا؟) دمای منبع را اندکی بالا می‌بریم. به علت اختلاف دمای بین منبع و دستگاه مقدار کمی گرما به گاز منتقل می‌شود که درنتیجه‌ی آن گاز کمی منبسط می‌شود و پیستون را اندکی به سمت راست جابه‌جا می‌کند. اگر گرما دادن به گاز را به همین روش به‌صورت بسیار آهسته ادامه دهیم، گاز به کندی منبسط می‌شود و پیستون بسیار آهسته

به طرف راست حرکت می‌کند. در این حالت، شتاب حرکت پیستون بسیارکوچک و نزدیک به صفر خواهد بود. درنتیجه، نیرویی که گاز به پیستون وارد می‌کند، باید با نیرویی که محیط به پیستون وارد می‌کند، برابر باشد. بنابراین، می‌توان گفت که در حین گرمادادن همواره فشار گاز با فشار محیط برابر است ؛ یعنی، در حین فرایند، فشار گاز ثابت می‌ماند. نمودار P-Vی این فرایند در شکل ۱ـ۷ ب نشان داده شده است.

در این فرایند، هم گرما و هم کار مبادله می‌شوند. در ابتدا کار را محاسبه می‌کنیم.

اگر فشار گاز P باشد، گاز در حین فرایند نیروی PA را به پیستون وارد می‌کند که در آن A مساحت پیستون است. اگر جابه‌جایی پیستون برابر با d باشد، با استفاده از رابطه‌ی ۴ـ۱ در فیزیک۲ و آزمایشگاه، کار W' که دستگاه روی محیط انجام می‌دهد از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$W' = (PA)d$$

ولی Ad، تغییر حجم استوانه است که برابر است با $\Delta V = V_2 - V_1$. درنتیجه،

$$W' = P\Delta V \qquad (۱ـ۸)$$

در بخش قبل دیدیم که کار محیط روی دستگاه (W) و کار دستگاه روی محیط (W') برابرند و علامت مخالف دارند. درنتیجه داریم :

$$W = -P\Delta V \qquad (۱ـ۹)$$

تمرین ۱ـ۲

در بخش ۱ـ۳ دیدیم که W در تراکم مثبت و در انبساط منفی است. نشان دهید که این نتیجه از رابطه‌ی ۱ـ۹ نیز به‌دست می‌آید.

پرسش ۱ـ۲

علامت W' در تراکم و انبساط گاز چیست؟

با توجه به شکل ۱ـ۷ ب، حاصل‌ضرب $P\Delta V$ برابر با سطح زیر نمودار P-V (مساحت هاشورزده) است. این نتیجه برای حالت خاص فرایند هم‌فشار به‌دست آمد ولی می‌توان نشان داد که در مورد تمام فرایندهای دیگر نیز درست است. یعنی، *در هر فرایند، قدرمطلق کار انجام‌شده را با محاسبه‌ی سطح زیر نمودار P-Vی آن فرایند می‌توان به‌دست آورد*. علامت کار را نیز می‌توان با

توجه به ملاحظات صفحه‌ی قبل تعیین کرد. در آن‌چه از این پس می‌آید، که به جز در مواردی که به صراحت قید شود، منظور از کار، W، یعنی **کار انجام‌شده بر روی دستگاه** است.

مثال ۱ــ۴

در یک فرایند هم‌فشار یک لیتر گاز کامل $O_۲$ در دمای ۳۰۰K مقداری گرما از دست می‌دهد و حجم آن در فشار یک آتمسفر به ۰/۹ حجم اولیه‌اش می‌رسد. دمای نهایی و کار انجام‌شده را محاسبه کنید.

حل: چون حجم گاز به‌طور هم‌فشار کاهش یافته است، داریم :

$$\frac{V_۱}{T_۱} = \frac{V_۲}{T_۲}$$

$$\frac{۱}{۳۰۰} = \frac{۰/۹}{T_۲}$$

$$T_۲ = ۲۷۰K$$

در این فرایند، کار انجام‌شده با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۹، به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$W = -P\Delta V = -۱\times۱۰^{۵}(۰/۹-۱)\times۱۰^{-۳} = ۱۰J$$

اکنون به محاسبه‌ی گرمای مبادله شده در فرایند هم‌فشار می‌پردازیم. در این حالت نیز می‌توانیم از رابطه‌ی ۱ــ۴ استفاده کنیم ولی همان‌طور که در مورد فرایند هم‌حجم انجام دادیم، باید از گرمای ویژه‌ی مربوط به فرایند هم‌فشار که به‌صورت زیر تعریف می‌شود، استفاده کنیم. **گرمای ویژه‌ی یک گاز در فشار ثابت برابر است با مقدار گرمایی که در فشار ثابت به یکای جرم آن داده می‌شود تا دمای آن یک کلوین بالا رود.** گرمای ویژه در فشار ثابت را با C_p نشان می‌دهیم ؛ بنابراین، رابطه‌ی ۱ــ۴ در مورد فرایند هم‌فشار به‌صورت زیر درمی‌آید :

$$Q = mc_p\Delta T \qquad (۱ــ۱۰)$$

در این‌جا نیز مقدار گاز را برحسب مول بیان می‌کنیم و به جای m مقدار nM را در رابطه‌ی ۱ــ۱۰ قرار می‌دهیم. سپس کمیت Mc_P را با C_{MP} نمایش می‌دهیم که **ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت** نامیده می‌شود. **C_{MP} مقدار گرمایی است که در فشار ثابت به یک مول از یک گاز داده می‌شود تا دمای آن یک کلوین بالا رود.** در این صورت، رابطه‌ی ۱ــ۱۰ به‌صورت زیر درمی‌آید.

$$Q = nC_{MP}\Delta T \qquad (۱ــ۱۱)$$

ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت چند گاز در ستون چهارم جدول ۱ــ۱ آمده است. می‌توان نشان داد که با تقریب خوبی C_{MP} به جنس گاز بستگی ندارد و برای گازهای تک‌اتمی برابر با $\frac{5}{2}R$ ، برای گازهای دو اتمی برابر با $\frac{7}{2}R$ است.

مثال ۱ــ۵

مقدار گرمایی را که گاز O_2 در مثال ۱ــ۴ از دست می‌دهد، محاسبه کنید.

حل: مقدار n در مثال ۱ــ۴ برابر است با :

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{1\times10^5\times1\times10^{-3}}{8/3\times300} = 0/04 \quad \text{مول}$$

با استفاده از جدول ۱ــ۱ و رابطه‌ی ۱ــ۱۱ داریم :

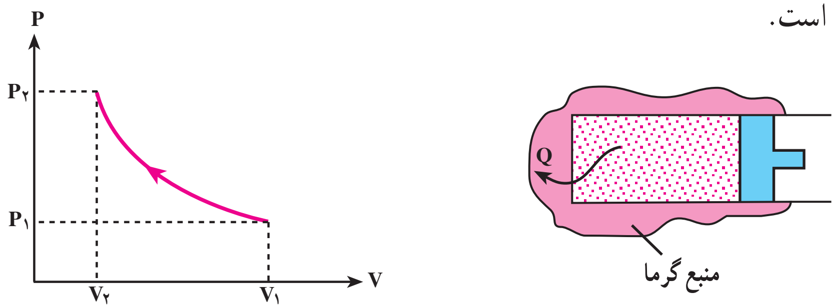
$$Q = nC_{MP}(T_2 - T_1) = 0/04(29/4)(270-300) = -35/3\,J$$

جدول ۱ــ۱ــ ظرفیت گرمایی مولی چند گاز در حجم ثابت و در فشار ثابت

	گاز	C_{MV} J/mol K	C_{MP} J/mol K
گازهای تک اتمی	He	۱۲/۵	۲۰/۸
	Ar	۱۲/۵	۲۰/۸
گازهای دو اتمی	H_2	۲۰/۴	۲۸/۸
	N_2	۲۰/۸	۲۹/۱
	O_2	۲۱/۲	۲۹/۴
گازهای چند اتمی	CO_2	۲۸/۵	۳۷
	NH_3	۲۷/۸	۳۶/۸

پ ــ فرایند هم‌دما: دمای دستگاه در حین این فرایند ثابت می‌ماند ؛ مثلاً، برای انجام تراکم هم‌دما در یک گاز، می‌توان استوانه‌ی شکل ۱ــ۲ را مطابق با شکل ۱ــ۸ الف در تماس با یک منبع گرما قرار داد و گاز را بسیار آهسته متراکم کرد. قبل از تراکم، گاز و منبع در حالت تعادل‌اند.

در نتیجه‌ی تراکم، دمای گاز اندکی بالا می‌رود و اختلاف دمای آن با منبع سبب می‌شود که گاز مقداری گرما از دست بدهد و دمای آن با دمای منبع یکسان شود. با ادامه‌ی تراکم، گاز مقداری گرما از دست می‌دهد و دمای آن در حین تراکم ثابت باقی می‌ماند. نمودار P-Vی این تراکم در شکل ۱ــ۸ ب نمایش داده شده است.



(الف) (ب)

شکل ۱ــ۸

پرسش ۱ـ۳

در فرایند هم‌دما (شکل ۱ــ۸) علامت Q و W چیست؟

فعالیت ۱ـ۴

انتهای یک سرنگ را مسدود و آن‌را وارد مخلوط آب و یخ کنید. پس از مدتی گاز را به‌آرامی متراکم کنید. آیا می‌توان این فرایند را هم‌دما در نظر گرفت؟

مثال ۱ـ۶

۰/۲ مول از یک گاز کامل در دمای ۳۰۰K در داخل استوانه‌ای به حجم ۵ لیتر قرار دارد. گاز را به‌طور هم‌دما متراکم می‌کنیم. مطلوب است : الف) فشار گاز در حجم‌های ۴،۳،۲،۱ و ۵ لیتر ؛ ب) رسم نمودار P-Vی این فرایند.

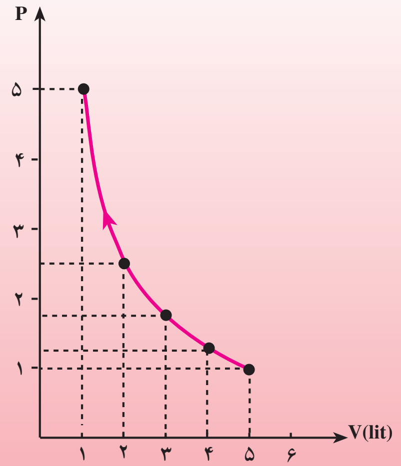
حل: الف) با استفاده از معادله‌ی حالت گاز کامل داریم :

$$P=\frac{nRT}{V}=\frac{۰/۲\times ۸/۳\times ۳۰۰}{۵\times ۱۰^{-۳}}=۹۹۶۰۰\simeq ۱\text{atm}$$

به همین ترتیب، برای حجم‌های ۴، ۳، ۲ و ۱ لیتر به‌ترتیب فشارهای ۱/۲۵،

۱/۷، ۲/۵ و ۵ آتمسفر به‌دست می‌آیند.

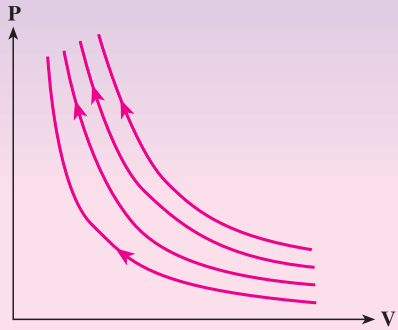
ب) با استفاده از مقدارهای بالا به‌کمک نقطه‌یابی نمودار P-Vی این فرایند در شکل ۱ــ۹ رسم شده است.



شکل ۱ــ۹

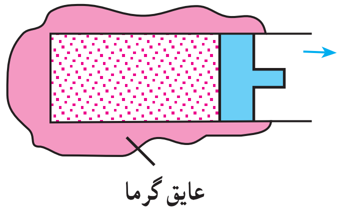
تمرین ۱ــ۳

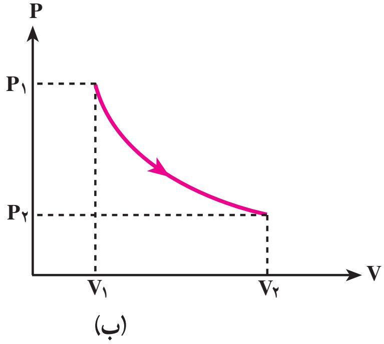
در شکل ۱ــ۱۰ نمودار P-Vی مربوط به تراکم هم‌دمای یک گاز در دماهای $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$ نشان داده شده است. تعیین کنید که هر نمودار مربوط به کدام دماست.



شکل ۱ــ۱۰

ت ــ فرایند بی‌دررو: در این فرایند بین دستگاه و محیط گرما مبادله نمی‌شود. برای انجام‌دادن این فرایند، باید دستگاه را مطابق شکل ۱ــ۱۱ الف عایق‌بندی کنیم و سپس عمل تراکم یا انبساط را بسیار آهسته انجام دهیم. نمودار P-Vی انبساط بی‌دررروی گاز در شکل ۱ــ۱۱ ب نشان داده شده است.





شکل ۱ــ۱۱

پرسش ۱ــ۴

چگونه می‌توان تراکم گاز را در فعالیت ۱ــ۴ به‌صورت بی‌دررو انجام داد؟ توضیح دهید.

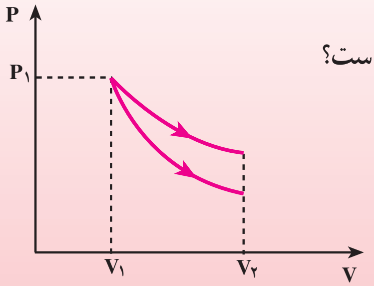
هنگامی که یک گاز را به‌سرعت متراکم (یا منبسط) می‌کنیم، گاز فرصت تبادل گرما را با محیط پیدا نمی‌کند. در این صورت نیز می‌توان گفت که فرایند به‌صورت بی‌دررو انجام شده است.

مثال ۱ــ۷

گازی را در حجم V_1 و فشار P_1 در نظر بگیرید. آن را یک بار به صورت هم‌دما و یک بار به صورت بی دررو منبسط می‌کنیم. نمودارهای مربوط در شکل ۱ــ۱۲ رسم شده‌اند.

الف) کدام یک از نمودارها به فرایند بی‌دررو و کدام یک به فرایند هم‌دما مربوط است؟

ب) در کدام فرایند $|W|$ بیش‌تر است؟



شکل ۱ــ۱۲

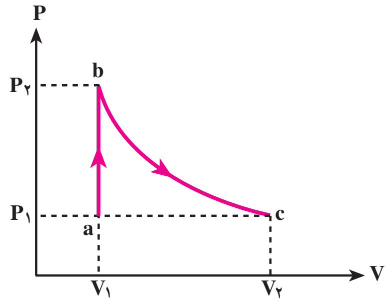
حل: الف) در انبساط هم‌دما فشار گاز کاهش می‌یابد (چرا؟) ولی چون گاز در این فرایند با یک منبع گرما در تماس است، مقداری گرما از منبع گرما می‌گیرد و درنتیجه کاهش فشار در آن در مقایسه با فرایند بی‌دررو، که در طی آن گاز گرما نمی‌گیرد، کم‌تر است. بنابراین، نمودار هم‌دما در بالای نمودار بی‌دررو قرار می‌گیرد.

ب) چون سطح زیر نمودار مربوط به انبساط هم‌دما بیش‌تر است، $|W|$ برای این فرایند مقدار بیش‌تری دارد.

تمرین ۱ـ۴

نمودارهای P-Vی مربوط به تراکم هم‌دما و تراکم بی‌دررروی یک گاز کامل را از فشار و حجم اولیه‌ی $P_۱$ و $V_۱$ رسم کنید.

دستگاه‌ها می‌توانند فرایندی را طی کنند که از مجموع چند فرایند تشکیل شده باشد. برای مثال، فرایندی را که در شکل ۱ــ۱۳ می‌بینید، از دو فرایند هم‌حجم و بی‌دررو تشکیل شده است. طی این فرایند، دستگاه از طریق یک فرایند هم‌حجم از حالت a (با حجم $V_۱$ و فشار $P_۱$) به حالت b (با حجم $V_۱$ و فشار $P_۲$) می‌رود. سپس از طریق یک انبساط بی‌دررو به حالت c (با حجم $V_۲$ و فشار $P_۱$) می‌رسد.

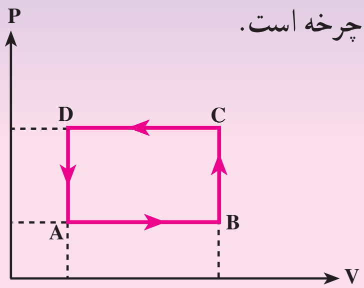


شکل ۱ــ۱۳

در این مثال، گاز را مثلاً می‌توان از طریق یک فرایند هم‌فشار به حالت اولیه (نقطه‌ی a) برگرداند.
فرایندی که در طول آن دستگاه پس از طی چند فرایند به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گردد، چرخه نامیده می‌شود.

تمرین ۱ـ۵

الف) در چرخه‌ی شکل ۱ــ۱۴ توضیح دهید که در هر مرحله، چه فرایندی انجام می‌شود. ب) تعیین کنید که کار انجام شده در چرخه مثبت است یا منفی؟ پ) نشان دهید که کار کل برابر با مساحت داخل چرخه است.



شکل ۱ــ۱۴

تمرین ۱ــ۶

گازکاملی را با حجم و فشار اولیه‌ی V_1 و P_1 در نظر بگیرید که چرخه‌ای به‌شرح زیر را طی می کند. (۱) حجم و فشار آن از طریق یک انبساط هم‌دما به V_2 و P_2 می‌رسد. (۲) سپس حجم و فشار آن از طریق یک انبساط بی‌دررو به V_3 و P_3 می‌رسد. (۳) در اثر یک تراکم هم‌دما حجم و فشار آن به V_4 و P_4 می‌رسد؛ (۴) سپس یک تراکم بی‌دررو طوری انجام می‌شود که حجم و فشار گاز را به مقدار اولیه‌ی آن‌ها برمی‌گرداند. این چرخه را در دستگاه P-V رسم کنید. (این چرخه، **چرخه‌ی کارنو** نامیده می‌شود).

۱ــ۵ــ انرژی درونی

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که انرژی درونی یک ماده با مجموع انرژی‌های مولکول‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن ماده برابر است. به‌طور دقیق‌تر، می‌توان گفت که انرژی درونی U با مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل مولکول‌های آن ماده برابر است. هنگامی که دستگاه در حالت معینی قرار دارد، که مثلاً با P، T تعیین می‌شود، مقدار U مشخص است و به این متغیرها بستگی دارد. در مورد گاز کامل می‌توان نشان داد که انرژی درونی **فقط تابع دمای مطلق گاز** است. هنگامی که دستگاه در یک فرایند با مبادله‌ی کار، گرما یا هر دو با محیط از یک حالت اولیه،که مثلاً انرژی درونی آن U_1 است، به یک حالت دیگر می‌رود ممکن است انرژی درونی آن تغییر کند و مثلاً به مقدار U_2 برسد. مقدار تغییر انرژی درونی، یعنی $\Delta U = U_2 - U_1$ ، به مقدار گرما و کار مبادله شده بین دستگاه و محیط ارتباط دارد. این ارتباط، موضوع قانون اوّل ترمودینامیک است.

پرسش ۱ــ۵

تغییر انرژی درونی یک دستگاه در یک چرخه چه‌قدر است؟

۱ــ۶ــ قانون اول ترمودینامیک

این قانون در واقع همان قانون پایستگی انرژی است که در مورد فرایندهای ترمودینامیکی به‌کار

می‌رود. اگر دستگاه در فرایندی، گرمای Q را بگیرد و کار W بر روی آن انجام شود، تغییر انرژی درونی آن بر طبق این قانون با رابطه‌ی زیر داده می‌شود.

$$\Delta U = Q + W \qquad (۱ـ۱۲)$$

این رابطه **قانون اوّل ترمودینامیک** نامیده می‌شود. در این رابطه، Q می‌تواند مثبت (دستگاه گرما بگیرد) یا منفی (دستگاه گرما از دست بدهد) باشد. W نیز می‌تواند مثبت (محیط روی دستگاه کار انجام دهد) یا منفی (دستگاه روی محیط کار انجام دهد) باشد. بنابراین، هنگامی که دستگاه با محیط تبادل گرما دارد، ممکن است انرژی درونی آن افزایش ($\Delta U > ۰$)، یا کاهش ($\Delta U < ۰$) یابد یا این که تغییر نکند ($\Delta U = ۰$).

مثال ۱ــ۸

در مثال‌های ۱ــ۴ و ۱ــ۵ تغییر انرژی درونی گاز چه‌قدر است؟

حل: در مثال‌های ۱ــ۴ و ۱ــ۵ دیدیم که دستگاه ۳۵/۳ J گرما از دست می‌دهد و کار انجام شده بر روی دستگاه ۱۰J است. تغییر انرژی درونی دستگاه از رابطه‌ی ۱ــ۱۲ به‌دست می‌آید :

$$\Delta U = Q + W = -۳۵/۳ + ۱۰ = -۲۵/۳\ J$$

تمرین ۱ــ۷

دستگاهی در یک انبساط بی‌دررو ۵ J کار بر روی محیط انجام می‌دهد. تغییر انرژی درونی آن چه‌قدر است؟

گرما و کاری که بین دستگاه و محیط مبادله می‌شوند، فقط در حین فرایند معنا دارند. در واقع، می‌توان گفت که انتقال انرژی بین دستگاه و محیط از طریق تبادل کار و گرما صورت می‌گیرد. پس از اتمام فرایند، انرژی‌های منتقل شده به‌صورت انرژی درونی دستگاه درمی‌آیند و دیگر نمی‌توانیم از موجودی کار یا گرمای دستگاه صحبت کنیم. حتی نمی‌توانیم مشخص کنیم که کدام بخش از افزایش انرژی درونی از کار و کدام بخش از گرما ناشی شده است. این وضع را می‌توان به دریاچه‌ای تشبیه کرد که آب آن در اثر بارش باران و واردشدن رودها افزایش می‌یابد. پس از این افزایش نمی‌توان گفت که کدام بخش از آب دریاچه از طریق رود و کدام بخش از آن از طریق باران تأمین شده است.

۱ــ۷ــ ماشین‌های گرمایی

تا حدود ۲۵۰ سال پیش انرژی مکانیکی مورد نیاز انسان به‌طور عمده از طریق نیروی ماهیچه‌ای انسان‌ها و حیوان‌ها تأمین می‌شد. از نیروی حاصل از باد و جریان آب (مثلاً در آسیاب‌های بادی و آبی) نیز انرژی مکانیکی به‌دست می‌آید. اما استفاده از این منابع انرژی فقط در زمان‌ها و مکان‌های خاصی امکان‌پذیر بود. امروزه بیش‌تر انرژی مورد نیاز انسان از طریق ماشین‌های گرمایی به‌دست می‌آید. این ماشین‌ها با استفاده از برخی فرایندهای ترمودینامیکی، گرمای حاصل از سوخت را به کار تبدیل می کنند.

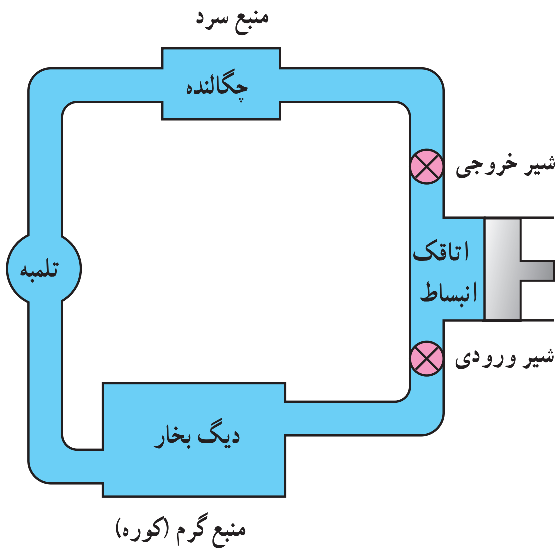
از نظر تاریخی اولین ماشین گرمایی، ماشین بخار بوده است. انرژی مکانیکی حاصل از ماشین بخار در مواردی از قبیل لکوموتیو، کشتی بخار و ... به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نیروگاه‌ها این انرژی ابتدا به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود و سپس از طریق شبکه‌ی برق رسانی به مکان‌های مختلف منتقل می‌گردد. از این طریق انرژی مورد نیاز انسان در محل کار و زندگی فراهم می‌آید.

ماشین‌های درون‌سوز نوع دیگری از ماشین‌های گرمایی هستند که با سوخت‌هایی چون بنزین یا گازوئیل کار می‌کنند. این نوع ماشین‌ها در موتور اتومبیل‌ها و کامیون‌ها و نیز در برخی هواپیماها به کار گرفته می‌شوند.

ماشین‌های گرمایی با ترکیب چند فرایند (مانند شکل فرایندهای تمرین‌های ۱ــ۵ و ۱ــ۶) مقداری گرما دریافت و بخشی از آن را به کار روی محیط تبدیل می‌کنند. از آن‌جا که این تبدیل انرژی باید دائماً انجام شود، طراحی این ماشین‌ها عموماً به این صورت است که دستگاه پس از پیمودن چند فرایند معین به‌حالت اولیه‌ی خود برمی‌گردد ؛ یعنی، **این ماشین‌ها در یک چرخه‌ی معین کار می‌کنند** و این چرخه، در ضمن کار ماشین دائماً تکرار می‌شود.

اساس کار همه‌ی ماشین‌های گرمایی یکسان است. در زیرچگونگی کار ماشین بخار و ماشین‌های گرمایی درون‌سوز را توضیح می‌دهیم. با بررسی این دو نمونه، با اساس کار ماشین‌های گرمایی آشنا می‌شوید.

الف ــ ماشین بخار: ماشین بخار در نواحی مختلف جهان به‌طور گسترده برای تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرد. دیدیم که در ماشین‌های گرمایی، *دستگاه* در یک چرخه *مقداری گرما دریافت می‌کند و بر روی محیط کار انجام می‌دهد*. در ماشین بخار دستگاهی که چرخه را طی می‌کند، آب است. همان‌طور که در شکل ۱ــ۱۵ نشان داده شده است، آب در دیگ بخار مقداری گرما دریافت می‌کند و پس از انجام‌دادن چند فرایند مختلف، که در زیر به توضیح آن‌ها می‌پردازیم ، به حالت اولیه‌ی خود در دیگ بخار برمی‌گردد و این چرخه دائماً تکرار می‌شود. چون گرما توسط کوره (یعنی از بیرون دستگاه) به آب داده می‌شود، *این ماشین را برون‌سوز می‌نامند*.



شکل ۱ــ۱۵ــ بخش‌های اصلی ماشین بخار عبارت‌اند از: دیگ بخار، اتاقک انبساط، چگالنده، تلمبه، شیرهای ورودی و خروجی و لوله‌های رابط.

برای بررسی نحوه‌ی کار ماشین بخار، مقدار مشخصی آب را در دیگ بخار در نظر می‌گیریم. فرایندهایی را که آب در ماشین بخار طی می‌کند، به چهار مرحله‌ی اصلی تقسیم می‌کنیم.

الف) مرحله‌ی اول: در این مرحله، آب درون دیگ بخار در فشار ثابت از کوره گرما می‌گیرد و به بخار تبدیل می‌شود. دما و حجم بخار آب در این مرحله تا حد معینی افزایش می‌یابد.

ب) مرحله‌ی دوم: شیر ورودی باز می‌شود و بخار آب که دما و فشار آن بسیار زیاد است، وارد اتاقک انبساط می‌شود؛ به پیستون نیرو وارد می‌کند و آن‌را به حرکت درمی‌آورد. درنتیجه‌ی این حرکت، بخار آب به‌سرعت منبسط می‌شود و دما و فشار آن کاهش می‌یابد. چون این انبساط بسیار سریع انجام می‌شود، این فرایند را می‌توان بی‌دررو در نظر گرفت. این حرکت پیستون برای به‌کار انداختن مولد برق، به‌حرکت درآوردن چرخ‌های لکوموتیو و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. *کاری که دستگاه بر روی محیط انجام می‌دهد (یعنی، کاری که ماشین گرمایی انجام می‌دهد)* در این مرحله به‌دست می‌آید.

پ) مرحله‌ی سوم: طراحی ماشین به‌گونه‌ای است که وقتی پیستون به انتهای مسیر خود رسید، بازگردانده می‌شود. در هنگام بازگشت پیستون، شیر ورودی بسته و شیر خروجی باز می‌شود و بخار آب به سمت چگالنده، که لوله‌های آب سرد آن را خنک می‌کنند، هدایت می‌شود. در چگالنده،

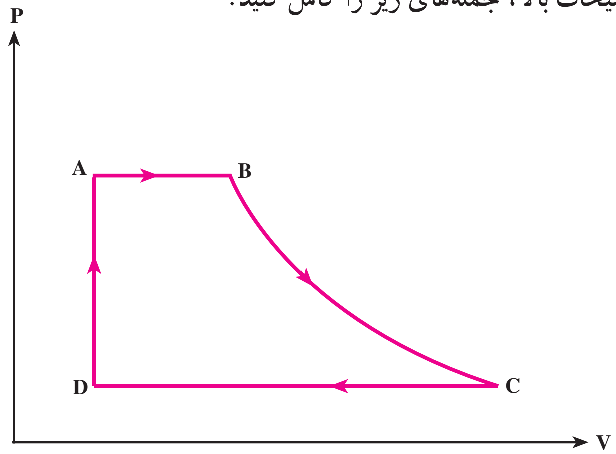
بخار آب در فشار ثابت گرما از دست می‌دهد و به مایع تبدیل می‌شود (میعان). در این فرایند، دما و حجم (بخار آب) کاهش می‌یابد.

ت) مرحله‌ی چهارم: تلمبه، آب حاصل از میعان را به دیگ بخار برمی‌گرداند و فشار آن را به فشار اولیه می‌رساند و یک چرخه‌ی ترمودینامیکی کامل می‌شود.

در حین کار ماشین بخار، این چرخه دائماً تکرار می‌شود. دستگاه در این چرخه به‌طور عمده با دو منبع گرما (کوره و چگالنده) تبادل گرما می‌کند. کوره را که در دمای بالاتری قرار دارد، **منبع گرم** و چگالنده را **منبع سرد** می‌نامیم.

فعالیت ۱ــ۵

نمودار P-Vی یک ماشین بخاردر شکل ۱ــ۱۶ نشان داده شده است. با توجه به توضیحات بالا، جمله‌های زیر را کامل کنید.



شکل ۱ــ۱۶ــ نمودار P-Vی یک ماشین بخار آرمانی

از A تا B ــ تبدیل آب به بخار آب داغ در فشار ثابت

از B تا C ــ انبساط بی‌دررو‌ی بخار آب (در این مرحله، انرژی مکانیکی مورد نیاز از ماشین بخار به‌دست می‌آید)

از C تا D ــ میعان بخار آب در فشار ثابت

از D تا A ــ افزایش فشار آب تا فشار اولیه در حجم تقریباً ثابت

الف ــ در مسیر A تا B، آب با گرفتن گرما از کوره به ... تبدیل می‌شود و حجم و دمای آن ... می‌یابد.

ب ــ در مسیر B تا C بخار آب داغ وارد استوانه می‌شود و سبب ... می‌شود. درنتیجه‌ی این عمل، فشار و دمای بخار آب ... می‌یابد.

پ ــ در مسیر C تا D بخار آب گرما از دست می‌دهد. دمای آن پایین می‌آید و ... می‌شود.

ت ــ در مسیر D تا A تلمبه آب را به دیگ بخار برمی‌گرداند. در این عمل، فشار آب به ....

ث ــ در یک چرخه‌ی کامل ماشین بخار، دستگاه از .... مقداری گرما می‌گیرد، مقداری کار انجام می‌دهد و بقیه را به ... می‌دهد.

فعالیت ۱ــ۶

با استفاده از نمودار P-Vی ماشین بخار

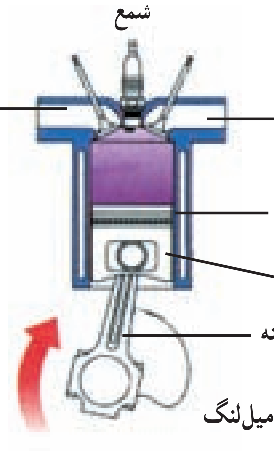
الف ــ نوع فرایند را در هر مرحله بیان کنید.

ب ــ مشخص کنید که آب در مراحل AB، BC و CD گرما گرفته یا از دست داده است؟

پ ــ کار انجام‌شده را در هر مرحله با استفاده از سطح زیر نمودار مشخص کنید وعلامت کار انجام شده در چرخه‌ی کامل را تعیین کنید.

ت ــ انرژی درونی دستگاه در فرایند B تا C افزایش می‌یابد یا کاهش؟

ب ــ ماشین گرمایی درون‌سوز: موتورهای پیستونی یکی از متداول‌ترین انواع موتورهای درون‌سوزاند. موتور همه‌ی اتومبیل‌ها، هواپیماهای ملخ‌دار، بعضی از کشتی‌ها و قطارها و نیروگاه‌های کوچک، درون‌سوز است. موتور گرمایی درون‌سوز در دو نوع بنزینی و دیزلی طراحی شده است. در این‌جا به توصیف موتور بنزینی می‌پردازیم. قسمت اصلی این موتور از یک استوانه که پیستون در داخل آن حرکت می‌کند، تشکیل شده است. اجزای موتور در شکل ۱ــ۱۷ نشان داده شده است. در این نوع موتور بخشی از انرژی حاصل از سوخت، سبب حرکت پیستون می‌شود. این حرکت از طریق دسته و میل‌لنگ به حرکت دورانی تبدیل می‌شود. با انتقال این حرکت دورانی به چرخ‌ها



شکل ۱ـــ۱۷ـــ اجزای موتور

اتومبیل حرکت می‌کند. بخش دیگر انرژی از طریق رادیاتور، که موتور را سرد می‌کند، و لوله‌ی خروجی (اگزوز) مستقیماً به هوا داده می‌شود.

مراحل مختلف کار ماشین‌های گرمایی درون‌سوز به‌شرح زیر است.

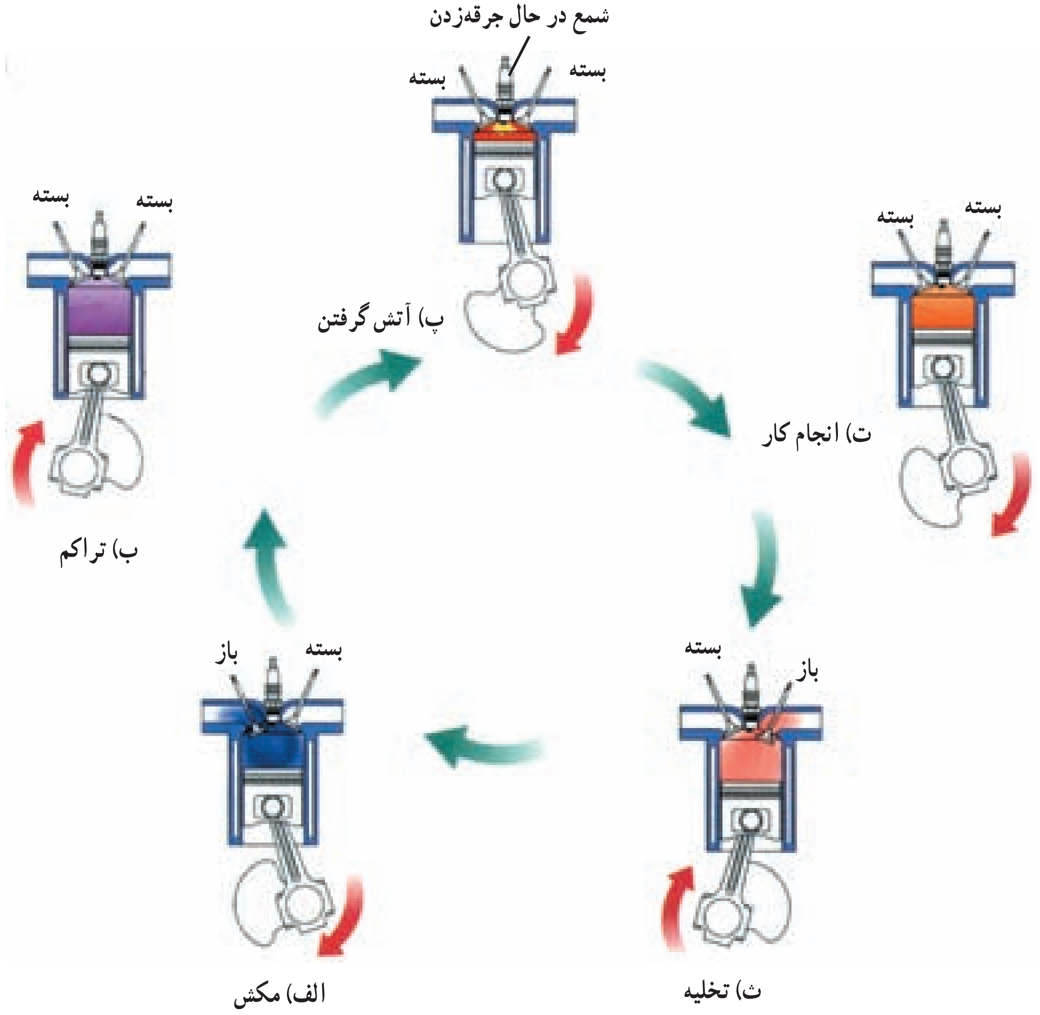
الف) مرحله‌ی مکش: با پایین‌آمدن پیستون (از یک وضعیت اولیه) مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچه‌ی ورودی وارد استوانه می‌شود. وقتی پیستون به پایین‌ترین وضعیت خود رسید، این دریچه بسته می‌شود و مخلوط بنزین و هوا در داخل استوانه محبوس می‌شوند.

ب) مرحله‌ی تراکم: پیستون بالا می‌آید، مخلوط را متراکم می‌کند و به حجم اولیه می‌رساند. در این وضعیت، دمای مخلوط بسیار بالا می‌رود.

پ) مرحله‌ی آتش‌گرفتن: هنگامی که پیستون به بالاترین وضعیت خود رسید، شمع جرقه می‌زند، مخلوط آتش می‌گیرد و دما و فشار آن تا مقدار زیادی بالا می‌رود. چون آتش‌گرفتن مخلوط در داخل استوانه رخ می‌دهد و مخلوط از بیرون گرما نمی‌گیرد، این موتورها را **درون‌سوز** می‌گویند.

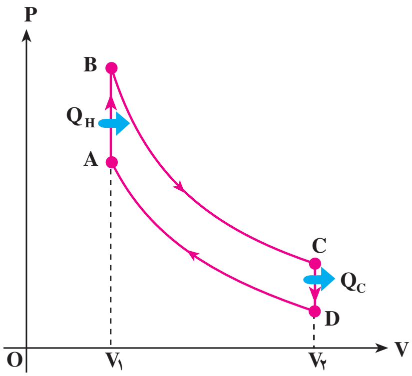
ت) مرحله‌ی انجام کار: در این مرحله در اثر فشار زیاد، دستگاه منبسط می‌شود و پیستون را به‌طرف پایین می‌راند. *کاری که دستگاه بر روی محیط انجام می‌دهد، در این مرحله حاصل می‌شود.*

ث) مرحله‌ی تخلیه: در این مرحله، بخشی از دود حاصل از سوختن مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچه‌ی خروج دود، که در این مرحله باز می شود، خارج می‌گردد و سپس پیستون بالا آمده و بقیه‌ی دود را خارج می‌کنند. به این ترتیب، مقدار زیادی گرما به هوای بیرون داده می‌شود. موتور دائماً این چرخه را تکرار می‌کند. مرحله‌های مختلف کار موتور درون‌سوز در شکل ۱ـــ۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱ــ۱۸ــ مراحل مختلف در چرخه‌ی موتورهای درون‌سوز

معمولاً برای بررسی ساده‌تر و تطبیق طرز کار این موتورها با چرخه‌های ترمودینامیکی، فرض می‌شود که مخلوط آتش نگیرد ولی آن قدر گرما به آن داده شود که به فشار و دمای نهایی در مرحله‌ی آتش‌گرفتن، برسد. در مرحله‌ی تخلیه نیز فرض می‌شود که دستگاه در داخل استوانه باقی بماند ولی آن‌قدر از آن گرما گرفته شود تا به وضعیت اولیه برگردد. به این ترتیب، چرخه‌ی معادلی به‌نام چرخه‌ی اتو (مطابق شکل ۱ــ۱۹) برای این ماشین‌ها در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱ــ۱۹ــ چرخه‌ی اتو

A تا B ــ دستگاه مقداری گرما می‌گیرد و دما و فشار آن به مقدار زیادی بالا می‌رود (معادل مرحله‌ی آتش‌گرفتن)

B تا C ــ دستگاه منبسط می‌شود و پیستون را به طرف پایین می‌راند.

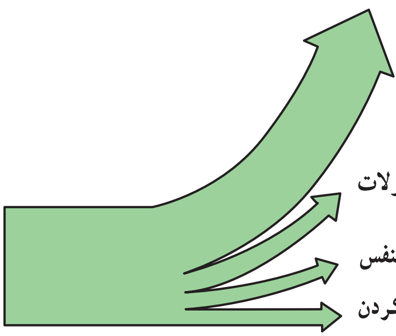
C تا D ــ دستگاه مقداری گرما از دست می‌دهد و دما و فشار آن کاهش می‌یابد (معادل مرحله‌ی تخلیه)

D تا A ــ دستگاه متراکم می‌شود و فشار و حجم آن به وضعیت اولیه برگردانده می‌شود.

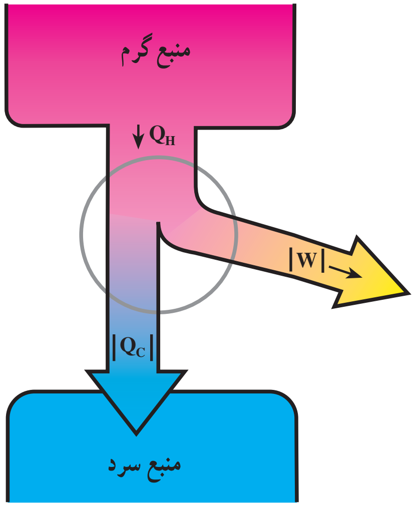
۱ــ۸ــ بازده‌ی ماشین گرمایی

در بررسی ماشین‌های بخار و درون‌سوز دیدیم که دستگاه مقداری گرما Q_H از منبع گرم می‌گیرد. قسمتی از آن را به کار $|W|$ تبدیل می‌کند و بقیه‌ی گرما $|Q_C|$ را به منبع سرد می‌دهد. این نتیجه برای ماشین‌های بخار و درون‌سوز به‌دست آمد ولی ماشین‌های گرمایی دیگر نیز بر همین اساس کار می‌کنند. حتی بدن انسان نیز در حدود ۲۵ درصد از انرژی حاصل از مواد غذایی را به کار تبدیل می‌کند و بقیه را به‌صورت گرما و ... به محیط بیرون می‌دهد (شکل ۱ ــ ۲۰).

با توجه به آن چه گفته شد، طرز کار ماشین‌های گرمایی را می‌توان در شکل ۱ــ۲۱ خلاصه کرد.



شکل ۱ــ۲۰



شکل ۱ــ۲۱

دراین شکل طرز کار ماشین‌های گرمایی به صورت طرح‌وار نشان داده شده است. بخشی از گرمای گرفته‌شده Q_H به کار $|W|$ تبدیل می‌شود و بقیه‌ی آن، $|Q_C|$، به منبع سرد داده می‌شود.

قانون اوّل ترمودینامیک را می‌توان برای یک چرخه‌ی این ماشین‌ها به‌صورت زیر نوشت :

$$\Delta U = Q_H - |Q_C| - |W| \qquad (۱۳ــ۱)$$

چون دستگاه پس از طی کردن یک چرخه به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گردد، $\Delta U = 0$ است. درنتیجه، کاری که ماشین گرمایی بر روی محیط انجام می‌دهد، از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$|W| = Q_H - |Q_C| \qquad (۱۴ــ۱)$$

بازده‌ی (η) ماشین‌های گرمایی به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} \qquad (۱۵ــ۱)$$

این کمیت نشان می‌دهد که چه کسری از گرمای حاصل از سوخت به‌کار تبدیل می‌شود. با استفاده از رابطه‌ی (۱۴ــ۱) $|W| \leq Q_H$ است. درنتیجه، بازده‌ی ماشین‌های گرمایی نمی‌تواند بیش‌تر از ۱ باشد. بازده‌ی ماشین‌های بخار در حدود ۵۰ درصد و ماشین‌های درون‌سوز در بهترین وضعیت در حدود ۴۰ درصد است.

پرسش ۱ــ۶

یکای بازده چیست؟

پرسش ۱ـ۷

چگونه می‌توان بازده‌ی ماشین گرمایی را افزایش داد؟

مثال ۱ـ۹

یک ماشین گرمایی در هر چرخه ۴۰۰۰J گرما را از منبع گرم دریافت می‌کند و ۲۵۰۰J گرما به منبع سرد می‌دهد. الف) در هر چرخه چه مقدار کار بر روی محیط انجام می‌شود؟ ب) بازده‌ی این ماشین چه‌قدر است؟

حل: الف) از رابطه‌ی ۱ـ۱۳ داریم :

$$|W| = Q_H - |Q_C|$$

$$|W| = ۴۰۰۰ - ۲۵۰۰ = ۱۵۰۰J$$

ب) با استفاده از رابطه‌ی ۱ـ۱۴ بازده‌ی این ماشین به‌دست می‌آید.

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H}$$

$$\eta = \frac{۱۵۰۰}{۴۰۰۰} = ۰/۳۷۵$$

در این ماشین گرمایی حدود ۶۲ درصد از گرمای دریافت شده به منبع سرد داده شده و تنها حدود ۳۸ درصد آن به‌کار تبدیل شده است.

۱ــ۹ــ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی)

در بررسی ماشین‌های گرمایی در بخش قبل، دیدیم که *همه‌ی این ماشین‌ها با دو منبع گرما که دمای متفاوتی دارند، کار می‌کنند*. در این ماشین‌ها، دستگاه گرمای Q_H را از یک منبع گرم می‌گیرد مقداری از آن را به‌کار ($|W|$) تبدیل می‌کند و بقیه‌($|Q_C|$) را به یک منبع سرد می‌دهد. در واقع هیچ‌یک از ماشین‌های گرمایی که تاکنون ساخته شده‌اند، نمی‌توانند همه‌ی گرمای دریافتی را به‌کار تبدیل کنند.

پرسش ۱ـ۸

اگر ماشینی همه‌ی گرمای دریافتی را به‌کار تبدیل کند، آیا قانون اوّل ترمودینامیک نقض می‌شود؟

اکنون این سؤال پیش می‌آید که آیا فنّاوری امروز بشر به حدی نرسیده است که ماشینی بسازد که تمام گرمای دریافتی را به‌کار تبدیل کند؟ آیا در آینده ممکن است چنین ماشینی ساخته شود یا این که در آینده نیز ساختن چنین ماشینی امکان‌پذیر نیست؟

قانون دوم ترمودینامیک به این سؤال پاسخ می‌دهد. براساس این قانون، **ممکن نیست دستگاه چرخه‌ای را بپیماید که در حین آن مقداری گرما را از منبع گرم جذب و تمام آن را به‌کار تبدیل کند.**

بیان بالا، قانون دوم ترمودینامیک **به بیان ماشین گرمایی** نامیده می‌شود. توجه داریم که، همان‌طور که در پرسش ۱ــ ۸ مطرح شد، اگر در یک چرخه تمام گرما به‌کار تبدیل شود، قانون اوّل ترمودینامیک نقض نمی‌شود اما براساس قانون دوم ترمودینامیک امکان طراحی و ساخت ماشینی که این تبدیل را انجام دهد، غیرممکن است. اگر قانون دوم ترمودینامیک بر فرایندهای ترمودینامیک حاکم نبود، می‌توانستیم قطاری بسازیم که از هوا گرما بگیرد (هوا را سرد کند) و با تبدیل کامل آن به‌کار حرکت کند یا نیروگاهی در کنار دریا بسازیم که با سرد کردن آب دریا انرژی الکتریکی تولید کند.

فعالیت ۱ــ ۷

جمله‌های زیر را تکمیل کنید :

الف) بنابر قانون دوم ترمودینامیک، در یک چرخه مقدار مشخصی ...... نمی‌تواند به طورکامل به ...... تبدیل شود. ب) بازده‌ی یک ماشین گرمایی هرگز نمی‌تواند ...... باشد.

بیش‌ترین بازده‌ی یک ماشین گرمایی را **سعدی کارنو** مشخص کرده است. این بازده از ماشینی به‌دست می‌آید که با چرخه‌ی کارنو (که در تمرین ۱ــ ۶ معرفی شده است)، بین دو منبع گرم و سرد به‌ترتیب با دماهای T_H و T_C ، کار می‌کند. بازده‌ی ماشین کارنو از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$\eta_{max} = ۱ - \frac{T_C}{T_H} \qquad (۱ــ۱۶)$$

این بازده از بازده‌ی هر ماشین دیگری که بین این دو منبع کار کند، بیش‌تر است. به این علت، بازده با زیرنویس max مشخص شده است.

مثال ۱ــ۱۰

می‌خواهیم یک ماشین گرمایی بسازیم که منبع گرم آن آب سطح اقیانوس در دمای $۲۷^\circ C$ و منبع سرد آن آب اعماق اقیانوس در دمای $۷^\circ C$ باشد. حداکثر بازدهی که می‌توان به‌دست آورد (بازده‌ی ماشین کارنو) چه‌قدر است؟

حل:

$$T_C = ۲۷۳ + ۷ = ۲۸۰K$$

$$T_H = ۲۷۳ + ۲۷ = ۳۰۰K$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۱۶ داریم :

$$\eta_{max} = ۱ - \frac{T_C}{T_H}$$

$$\eta_{max} = ۱ - \frac{۲۸۰}{۳۰۰} = ۰/۰۶۷ = \%۶/۷$$

بازده‌ی هر ماشین دیگری که بین این دو منبع کار کند، از این مقدار کم‌تر است.

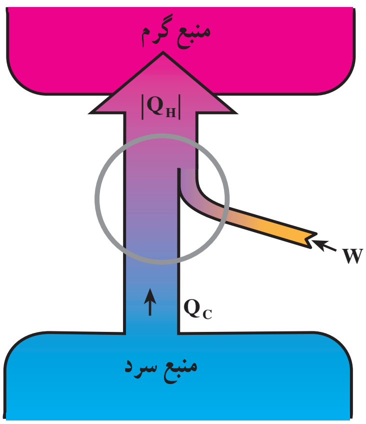
۱ــ۱۰ــ یخچال

اگر جسم سردی را در کنار جسمی گرم قرار دهیم، چه اتفاقی می‌افتد؟ آیا ممکن است گرما خودبه‌خود از جسم سرد به جسم گرم منتقل شود؟ یعنی جسم گرم گرما بگیرد و گرم‌تر شود و جسم سرد گرما از دست بدهد و سردتر شود؟

چه پدیده‌ای اتفاق می‌افتد که محتویات داخل یخچال سرد می‌شود؟ اگر یخچال به برق وصل نباشد، آیا باز هم این امر رخ می‌دهد؟

یخچال وسیله‌ای است که گرما را از جسم سرد به جسم گرم منتقل می‌کند. در یخچال هم دستگاه یک چرخه را طی می‌کند و در حین آن محیط با انجام کار W بر روی دستگاه گرمای Q_C را از منبع سرد (محتویات درون یخچال) می‌گیرد و گرمای $|Q_H|$ را به منبع گرم (هوای بیرون یخچال) می‌دهد.

طرز کار یخچال به‌صورت طرح‌وار در شکل ۱ــ۲۲ نشان داده شده است.



شکل ۱ــ۲۲

همان‌طور که در شکل ۱ــ۲۲ می‌بینید، یخچال مانند یک ماشین گرمایی است که در جهت عکس کار می‌کند. طرز کار یخچال در بخش مطالعه‌ی آزاد آمده است.

تمرین ۱ــ۸

علامت W، Q_H و Q_C را در یخچال مشخص کنید.

با استفاده از قانون اوّل ترمودینامیک، $\Delta U = -|Q_H| + Q_C + W$

چون در چرخه $\Delta U = ۰$ است،

$$|Q_H| = Q_C + W \quad (۱ــ۱۷)$$

ملاحظه می‌شودگرمایی که یخچال به هوای اطراف خود می‌دهد، بیش‌تر از گرمایی است که از داخل یخچال می‌گیرد.

مطالعه‌ی آزاد

ساز و کار یخچال

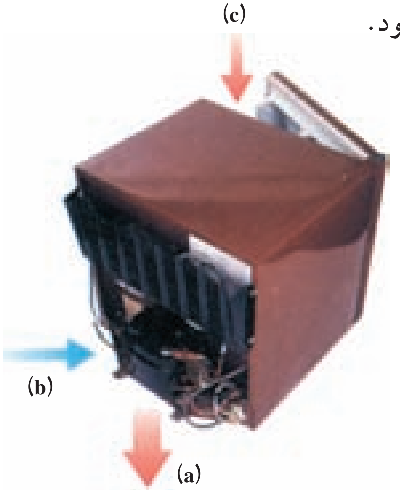
یخچال یکی از وسایل بسیار ضروری خانگی است. یخچال‌ها را در اندازه‌های مختلف می‌سازند و آن‌ها را با حجم داخلی مشخص می‌کنند؛ مثلاً یخچال ۹ فوت دارای حجم داخلی ۹ فوت مکعب یا حدود ۲۴۰ لیتراست.

در شکل ۱ــ۲۳ الف یک یخچال و در شکل ۱ــ۲۳ب نمایش طرح‌وار آن را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که در این دو شکل نشان داده شده است،قسمت‌های اصلی یخچال عبارت‌اند از: چگالنده، محفظه‌ی تبخیر، کمپرسور و شیر انبساط. چگالنده در تماس با منبع گرم (هوای بیرون یخچال) و محفظه‌ی تبخیر با منبع سرد (محتویات داخل یخچال) در تماس است. ماده‌ای که چرخه‌ی ترمودینامیکی را طی می‌کند، گاز فریون است.این گاز از جمله گازهایی است که به لایه‌ی اُزن صدمه می‌زند و پژوهش‌های زیادی برای جایگزینی آن انجام شده است. فریون در چگالنده به‌صورت مایع در فشار زیاد و در محفظه‌ی تبخیر به‌صورت گاز در فشار کم قرار دارد.

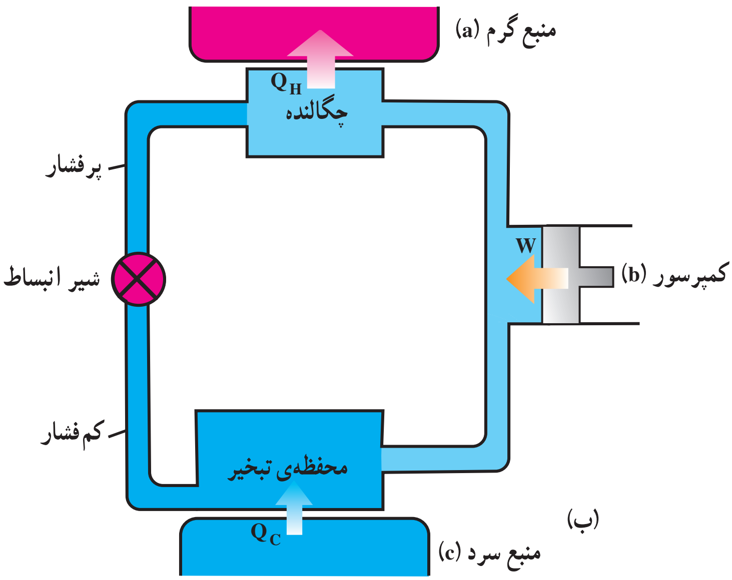
شیر انبساط راه بسیار باریکی است که این دو ناحیه‌ی کم‌فشار و پرفشار را به یک‌دیگر وصل می‌کند.

طرز کار یخچال به‌طور مختصر به شرح زیر است.

کمپرسور با انجام کار W گاز را از محفظه‌ی تبخیر می‌گیرد و به چگالنده منتقل می‌کند و دما و فشار آن را بالا می‌برد. در این مرحله، گاز که دمای آن از دمای منبع گرم بالاتر است، گرمای Q_H را به‌این منبع می‌دهد و مایع می‌شود. هنگامی که این مایع پرفشار از شیر انبساط می‌گذرد و وارد محفظه‌ی تبخیر با فشار کم می‌شود، به بخار تبدیل می‌گردد و گرمای نهان تبخیر Q_C را از منبع سرد می‌گیرد. در یخچال، این چرخه دائماً تکرار می‌شود.



(الف)

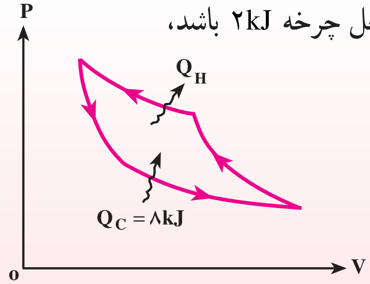


(ب)

شکل ۱ــ۲۳ــ الف) یخچال، ب) نمایش طرح‌واره آن

مثال ۱ــ۱۱

نمودار P-Vی چرخه‌ای که دستگاه در یک یخچال فرضی طی می‌کند، در شکل ۱ــ۲۴ نشان داده شده است. اگر دستگاه در هر چرخه ۸kJ گرما از منبع سرد بگیرد و مساحت داخل چرخه ۲kJ باشد،



شکل ۱ــ۲۴

الف) این یخچال در هر چرخه چه مقدار گرما به محیط می‌دهد؟

ب) فضایی که یخچال در آن قرار دارد، یک اتاق در بسته به ابعاد $۳m \times ۴m \times ۲m$ است. در هر چرخه، دمای اتاق چند کلوین افزایش می‌یابد؟ فرض کنید دمای اتاق $۲۷^\circ C$ و فشار آن یک آتمسفر و ظرفیت گرمایی مولی هوا در حجم ثابت $۲۰ J/mol.K$ است. $(R \simeq ۸\ J/mol.K)$

حل: الف) با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ ۱۷ داریم :

$$|Q_H| = Q_C + W$$

$$|Q_H| = ۸ + ۲ = ۱۰ kJ$$

ب) با استفاده از معادله‌ی حالت گاز کامل تعداد مول‌های موجود در اتاق را به‌دست می‌آوریم :

$$n = \frac{PV}{RT}$$

$$n = \frac{۱۰^۵ \times ۲۴}{۳۰۰ \times ۸} = ۱۰^۳ \text{ مول}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۷ تغییر دمای اتاق به‌دست می‌آید.

$$\Delta T = \frac{|Q_H|}{nC_{MV}}$$

$$\Delta T = \frac{۱۰ \times ۱۰^۳}{۱۰^۳ \times ۲۰} = ۰/۵K$$

ضریب عملکرد یخچال: از نظر اقتصادی بهترین یخچال، یخچالی است که با انجام کار (صرف انرژی الکتریکی) کم‌تر گرمای بیش‌تری را از درون یخچال (منبع سرد) به بیرون منتقل کند. ضریب عملکرد (K) یخچال به‌صورت نسبت گرمای گرفته شده از منبع سرد به کاری که موتور یخچال انجام می‌دهد، تعریف می‌شود :

$$K = \frac{Q_C}{W} \qquad (۱_۱۸)$$

هرچه ضریب عملکرد یخچال بیش‌تر باشد، استفاده از آن بیش‌تر مقرون به صرفه است. ضریب عملکرد یخچال‌های تجاری بین ۲ تا ۷ است.

پرسش ۱ــ۹

چگونه می‌توان ضریب عملکرد یخچال را افزایش داد؟

مثال ۱ــ۱۲

توان یک یخچال ۲۵۰ وات و ضریب عملکرد آن ۴ است.

الف) چه مدت طول می‌کشد تا در این یخچال ۱kg آب ۲۵°C به یخ $-۴^\circ C$ تبدیل شود؟

ب) در این مدت، چه مقدار گرما به هوای بیرون داده می‌شود؟

$c_{\text{آب}} = ۴۲۰۰ J/kgK$ و $c_{\text{یخ}} = ۲۱۰۰ J/kgK$ و $L_f = ۳۳۵۰۰۰ J/kg$

حل: الف) گرمای Q_C که آب از دست می‌دهد، برابر است با :

$$Q_C = mc_{\text{آب}}\Delta\theta_۱ + mL_f + mc_{\text{یخ}}\Delta\theta_۲$$

$$Q_C = ۱\times۴۲۰۰\times۲۵ + ۱\times۳۳۵۰۰۰ + ۱\times۲۱۰۰\times۴ = ۴۴۸۴۰۰ J$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱ــ۱۸ برای ضریب عملکرد یخچال داریم :

$$W = \frac{Q_C}{K} = \frac{۴۴۸۴۰۰}{۴} = ۱۱۲۱۰۰ \ J$$

با استفاده از رابطه‌ی توان، زمان لازم برای تبدیل آب به یخ به‌دست می‌آید :

$$t = \frac{W}{P} = \frac{۱۱۲۱۰۰}{۲۵۰} = ۴۴۸/۴ \ s = ۷/۵ \ \text{دقیقه}$$

ب) با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم :

$$|Q_H| = Q_C + W$$

$$|Q_H| = ۴۴۸۴۰۰ + ۱۱۲۱۰۰ = ۵۶۰۵۰۰ \ J$$

طرز کار کولر گازی مانند یخچال است. در کولر گازی منبع سرد در داخل اتاق و منبع گرم در بیرون قرار دارد. کولر با انجام کار، گرما را از داخل اتاق می‌گیرد و به هوای بیرون می‌دهد.

تمرین ۱ـ۹

توان مصرفی یک کولر گازی ۷۰۰ وات و ضریب عملکرد آن ۲/۵ است. این کولر در هر دقیقه چه مقدار گرمای اتاق را می‌گیرد و چه مقدار گرما به فضای بیرون می‌دهد؟

۱ــ۱۱ــ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان یخچالی)

می‌دانیم که گرما از جسم گرم به جسم سرد منتقل می‌شود ولی عکس این عمل، خودبه‌خود صورت نمی‌گیرد. اگر یک لیوان آب خنک در اتاق قرار داشته باشد، گرما خود به خود از آب به اتاق منتقل نمی‌شود. ولی وقتی آب را در داخل یخچال قرار می‌دهیم، یخچال با صرف انرژی مقداری گرما را از آب می‌گیرد و به هوای اتاق منتقل می‌کند. مطالب بالا موضوع قانون دوم ترمودینامیک به بیان یخچالی را تشکیل می‌دهد. براساس این بیان :

گرما به خودی خود از جسم سرد به جسم گرم منتقل نمی‌شود.

می‌توان نشان داد که دو بیان ماشین گرمایی و یخچالی قانون دوم ترمودینامیک، معادل یک‌دیگرند.

اگر قانون دوم به بیان یخچالی نقض شود (یعنی گرما به‌طور خود بخود از جسم سرد به جسم گرم منتقل شود)، قانون دوم به بیان ماشین گرمایی نیز نقض می‌شود (یعنی می‌توان ماشینی ساخت که در یک چرخه تمام گرما را به کار تبدیل کند) و به عکس.

تمرین‌های فصل اول

۱ــ در فرایند هم حجم چگونه می‌توان فشار گاز را افزایش داد؟

۲ــ حجم ۰/۵ مول از یک گاز کامل تک اتمی ۸/۳ لیتر و فشار آن ۱/۵ آتمسفر است. مقداری گرما به آن می‌دهیم تا فشار آن از طریق یک فرایند هم‌حجم دو برابر شود. کار و گرمای مبادله شده را برای این فرایند محاسبه کنید.

۳ــ در مسألهٔ ۲ فرض کنید که به جای گرما دادن حجم گاز را از طریق یک فرایند هم فشار نصف کنیم. کار و گرمای مبادله شده را برای این فرایند محاسبه کنید.

۴ــ نشان دهید در فرایند هم‌دما، هر چه دمای گاز بیش‌تر باشد، برای متراکم کردن آن تا یک اندازهٔ معین باید کار بیش‌تری انجام داد.

۵ــ نشان دهید در انبساط هم‌فشار گاز کامل، باید به آن گرما داد.

۶ــ در یک فرایند ۵۰۰J− کار برروی دستگاه انجام می‌شود و دستگاه ۴۰۰J گرما دریافت می‌کند، تغییر انرژی درونی آن چه‌قدر است؟

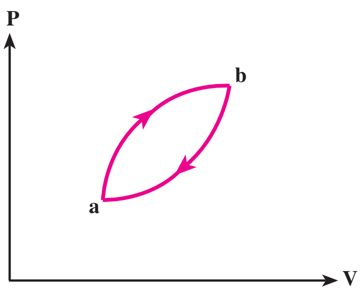
۷ــ فرایندی را نام ببرید که در آن دمای دستگاه بدون دریافت یا انتقال گرما تغییر می‌کند.

۸ــ در یک انبساط بی‌دررو گاز ۵۰۰J کار بر روی محیط انجام می‌دهد. تغییر انرژی درونی گاز چه‌قدر است؟

۹ــ در شکل ۱ــ۲۵ فرایند چرخه‌ای برای گازی نشان داده شده است.

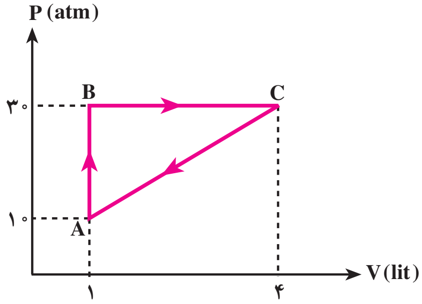
الف) تعیین کنید که گاز در این فرایند گرما گرفته یا از دست داده است؟

ب) اگر قدرمطلق گرمای مبادله شده ۴۰۰J باشد، کار انجام شده چه‌قدر است؟



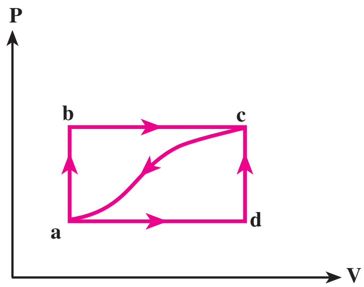
شکل ۱ــ ۲۵

۱۰ــ گاز داخل یک استوانه، چرخه‌ای مطابق شکل ۱ــ۲۶ را می‌پیماید. گرمای خالص داده شده به گاز در این چرخه چند ژول است؟



شکل ۱ــ۲۶

۱۱ــ دستگاهی مطابق شکل ۱ــ۲۷ از طریق مسیر abc از حالت a به c می‌رود.



شکل ۱ــ۲۷

در این مسیر، دستگاه ۹۰ ژول گرما می‌گیرد و ۷۰ ژول کار انجام می‌دهد.

الف) تغییر انرژی درونی دستگاه در مسیر abc چه‌قدر است؟

ب) اگر برای رسیدن به حالت c فرآیند از مسیر adc انجام شود،قدر مطلق کار انجام شده روی دستگاه در مقایسه با مسیر abc بیش‌تر است یا کم‌تر؟ گرمای داده شده به گاز بیش‌تر است یا کم‌تر؟

پ) اگر گاز را از مسیر (منحنی) به‌حالت a برگردانیم، چه‌قدر باید از آن انرژی بگیریم؟

۱۲ــ ته یک سرنگ را می‌بندیم. آن را درون مقداری آب می‌اندازیم و آب را به تدریج گرم می‌کنیم. هوای درون سرنگ چه فرایندی را طی می‌کند؟

۱۳ــ چرا برخی نیروگاه‌ها را در کنار رودهای بزرگ یا دریاها احداث می‌کنند؟

۱۴ــ یک ماشین بخار $۲/۲۵۴\times۱۰^{۴}$ kJ گرما از دیگ بخار دریافت می‌کند و $۱/۹۱۵\times۱۰^{۴}$ kJ گرما در چگالنده از دست می‌دهد.

الف) کار انجام شده در یک چرخه چند کیلوژول است؟

ب) بازده‌ی این ماشین چه‌قدر است؟

پ) بازده‌ی واقعی از این مقدار کم‌تر است؟ چرا؟

۱۵ــ یک موتور درون‌سوز در هر چرخه $۸۰۰۰J$ گرما از سوزاندن سوخت دریافت می‌کند و $۲۰۰۰J$ کار تحویل می‌دهد. گرمای حاصل از سوخت $۵×۱۰^۴ J/g$ است و موتور در هر ثانیه ۴۰ چرخه را می‌پیماید. کمیت‌های زیر را حساب کنید.

الف ــ بازده‌ی موتور،

ب ــ گرمای تلف شده در هر چرخه،

پ ــ سوخت مصرف شده در هر چرخه،

ت ــ توان موتور.

۱۶ــ ضریب عملکرد یک یخ‌ساز (فریزر) $K = ۴$ است. این یخ ساز در هر ساعت، $۱/۵kg$ آب با دمای $\theta_۱ = ۲۰^\circ C$ را به یخ با دمای $\theta_۲ = -۱۰^\circ C$ تبدیل می‌کند.

$$C_{آب} = ۴۲۰۰ J/kg.K \quad ، \quad C_{یخ} = ۲۱۰۰ J/kg.K \quad و \quad L_F = ۳۳۵۰۰۰ J/kg$$

الف ــ چه مقدار گرما در هر ساعت باید از آب گرفته شود؟

ب ــ یخ ساز در هر ساعت چه مقدار انرژی الکتریکی مصرف می‌کند؟

پ ــ چه مقدار گرما در هر ساعت به بیرون داده می‌شود؟

۱۷ــ آیا می‌توان با بازگذاشتن در یخچال، آشپزخانه را خنک کرد؟ در مورد پاسخ خود توضیح دهید.

۱۸ــ وجود برفک روی بدنه‌ی داخلی محفظه‌ی یخ‌ساز یخچال چه اثری بر عملکرد دستگاه دارد؟

۱۹ــ یک کولر گازی در هر دقیقه $۹×۱۰^۴ J$ گرما از اتاق می‌گیرد و در همان مدت، $۱/۳×۱۰^۵ J$ گرما به فضای بیرون می‌دهد.

الف ــ توان مصرفی این کولر چند وات است؟

ب ــ ضریب عملکرد آن چند است؟

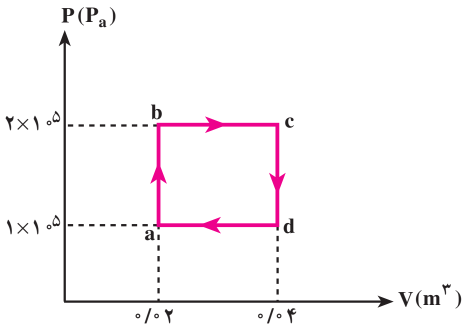
۲۰ــ یک مول از یک گاز کامل تک اتمی در یک ماشین گرمایی چرخه‌ای را مطابق شکل ۱ــ۲۸ می‌پیماید. مطلوب است :

الف ــ کار انجام شده در طی چرخه،

ب ــ گرمای مبادله شده در فرایند abc،

پ ــ بازده‌ی چرخه،

ت ــ بازده‌ی یک ماشین گرمایی کارنو که بین بالاترین و پایین‌ترین دمای چرخه عمل می‌کند، چه‌قدر است؟



شکل ۱ــ۲۸

۲۱ــ کمیت‌های Q_H، Q_C و W که در یک چرخه در یک ماشین گرمایی یا یخچال مبادله می‌شود، به‌صورت زیر داده شده است.

۱) $Q_H = ۱۰۰J$ ، $W = -۶۰J$ ، $Q_C = -۴۰J$

۲) $Q_H = ۱۰۰J$ ، $W = -۱۰۰J$ ، $Q_C = ۰$

۳) $Q_H = -۱۰۰J$ ، $W = ۶۰J$ ، $Q_C = ۴۰J$

۴) $Q_H = -۱۰۰J$ ، $W = ۰$ ، $Q_C = ۱۰۰J$

۵) $Q_H = ۱۰۰J$ ، $W = -۶۰J$ ، $Q_C = -۵۰J$

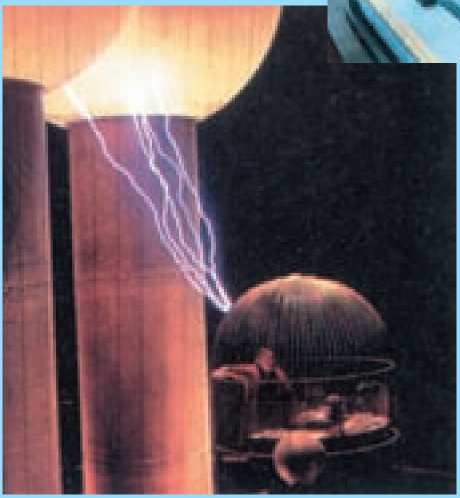
الف) در کدام مورد قانون دوم ترمودینامیک به بیان یخچالی نقض می‌شود؟

ب) در کدام مورد قانون دوم ترمودینامیک به بیان ماشین گرمایی نقض می‌شود؟

پ) در کدام مورد قانون اول ترمودینامیک نقض می‌شود؟

۲





شکل بالا یک مولد وان‌دوگراف را در موزه‌ی علوم بوستون نشان می‌دهد. این مولد یک تخلیه‌ی الکتریکی عظیم ایجاد می‌کند. اما همان‌طور که در شکل دیده می‌شود شخص درون قفس فلزی (اتاقک فارادی) از اثرهای این تخلیه حفاظت شده است.

فصل ۲

الکتریسیته ی ساکن

در کتاب‌های علوم دوره‌ی راهنمایی و نیز کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه، با بارالکتریکی و نحوه‌ی باردار کردن اجسام آشنا شدید و آموختید که دو نوع بار الکتریکی وجود دارد. بار الکترون را بار منفی و بار پروتون را مثبت نام‌گذاری کرده‌اند. علاوه بر این، دیدید که بار الکتریکی به‌وجود نمی‌آید و نیز از بین نمی‌رود و فقط از یک جسم به جسم دیگر منتقل می‌شود. به این بیان، **پایستگی بارالکتریکی** گفته می‌شود. هم‌چنین آموختید اجسام باردار بر یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. این نیروها ممکن است ربایشی یا رانشی باشند. بیش‌تر نیروهایی که شما با آن‌ها آشنا هستید و با آنها سر و کار دارید، منشأ الکتریکی دارند. به کمک این نیروها می‌توان ساختار اجسام، پیوند بین ذره‌ها و بسیاری از پدیده‌هایی را که در طبیعت رخ می‌دهند، توصیف کرد. دامنه‌ی کاربرد دانش الکتریسیته در فنّاوری و صنعت به قدری گسترده است که نیازی به بیان ندارد.

در این فصل، ضمن یادآوری مطالبی که قبلاً آموخته‌اید، به شرح و توصیف دقیق‌تر کمیت‌های الکتریکی و رابطه‌ی بین آن‌ها می‌پردازیم.

۲ــ۱ــ قانون کولن

همان‌طورکه در فیزیک ۱ و آزمایشگاه خواندید، دو جسمِ باردار بر یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. نیرویی که دو جسم باردار بر یک‌دیگر وارد می‌کنند، **نیروی الکتریکی** نام دارد. نیروهای الکتریکی ممکن است ربایشی (جاذبه‌ای) یا رانشی (دافعه‌ای) باشند. دیدیم که اگر بارهای الکتریکی دو جسم همنام باشند، یعنی هر دو مثبت یا هر دو منفی باشند، نیروهای بین دو جسم، رانشی است. در حالی که اگر بارالکتریکی یک جسم مثبت و بارالکتریکی دیگری منفی باشد، نیروی الکتریکی بین دو جسم، ربایشی خواهد بود.

نیروی الکتریکی بین دو جسم، به چه عامل‌هایی بستگی دارد و اندازه‌ی این نیروها را از چه رابطه‌ای می‌توان محاسبه کرد؟

شارل کولن، دانشمند فرانسوی، برای اولین بار با انجام دادن آزمایش‌های ساده و هوشمندانه‌ای

توانست عامل‌هایی را که نیروهای الکتریکی به آن‌ها بستگی دارند، شناسایی کند. شما هم می‌توانید با انجام دادن آزمایش‌های ساده‌ای، با این عامل‌ها آشنا شوید.

آزمایش ۲ـ۱

وسیله‌های آزمایش: میله‌ی پلاستیکی ــ پارچه‌ی پشمی ــ ورقه‌ی نازک آلومینیومی و مقداری نخ خشک

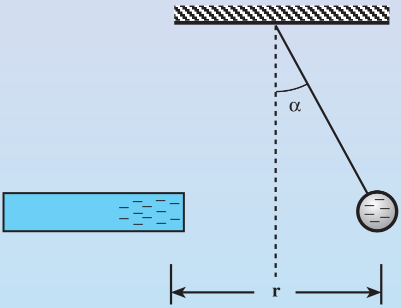
شرح آزمایش:

۱ــ کمی ورقه‌ی آلومینیومی را فشرده کنید و آن را به‌صورت کره‌ی کوچکی در آورید. این کره‌ی کوچک را به کمک یک تکه نخ خشک آویزان کنید. این وسیله را **آونگ الکتریکی** می‌نامیم و از آن در آزمایش‌های الکتریسیته‌ی ساکن استفاده می‌کنیم.

۲ــ به آونگ الکتریکی به روش القا یا با تماس به جسمی که بار منفی دارد، بارالکتریکی منفی بدهید.

۳ــ میله را باردار کرده و آن را به آونگ الکتریکی نزدیک کنید. چه اتفاقی می‌افتد؟

۴ــ میله را در فاصله‌ی معینی از آونگ و نزدیک آن نگه‌دارید و زاویه‌ی انحراف آونگ را از وضع قائم با دقت مشاهده کنید.



شکل ۲ــ۱*

۵ــ مرحله‌ی ۴ را تکرار کنید و هر بار فاصله‌ی میله را از آونگ تغییر دهید. مراقب باشید که در مراحل ۴ و ۵، میله با آونگ تماس پیدا نکند.

نتیجه‌ی آزمایش را بنویسید و به کلاس گزارش دهید.

* اجسام باردار با بار منفی را، با رنگ آبی و با بار مثبت را با رنگ قرمز نشان می‌دهیم.

کولن نیز با انجام دادن آزمایش و اندازه‌گیری‌های دقیق به این نتیجه رسید که :

نیروهای الکتریکی بین دو ذره‌ی باردار با مجذور فاصله‌ی آن‌ها از یک‌دیگر نسبت وارون دارد؛ یعنی :

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

برای آن‌که معلوم شود نیروی الکتریکی به چه عامل یا عامل‌های دیگری بستگی دارد، آزمایش ۲ــ۲ را انجام دهید.

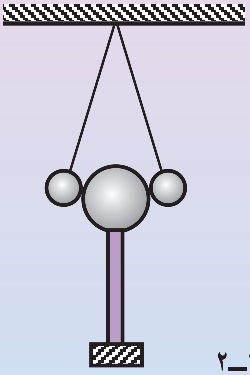
آزمایش ۲ــ۲

وسیله‌های آزمایش: برای انجام دادن این آزمایش، علاوه بر وسیله‌های آزمایش ۲ــ۱ به دو کره‌ی فلزی کوچک و هم‌اندازه که روی پایه‌های عایق نصب شده باشند، نیاز دارید.

شرح آزمایش:

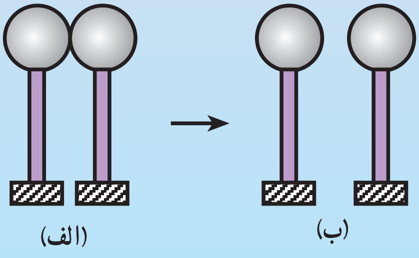
۱ــ دو آونگ الکتریکی کاملاً مشابه بسازید و آن‌ها را از یک نقطه آویزان کنید.

۲ــ یک کره را باردار کنید و آن را هم‌زمان به دو آونگ تماس دهید. سپس آن را از آونگ‌ها دور کنید. چه اتفاقی می‌افتد؟ زاویه‌ی بین دو نخ آونگ‌ها را بعد از دور شدن کره‌ی فلزی اندازه‌گیری کنید.



شکل ۲ــ۲

۳ــ کره‌ی دیگر را که بدون بار است به کره‌ی باردار تماس دهید و آن‌ها را از یک‌دیگر جدا کنید. با انجام دادن این عمل، بارالکتریکی به‌طور مساوی بین دو کره تقسیم می‌شود.



شکل ۲ــ۳

۴ــ ابتدا با تماس دست به آونگ‌ها، بار آن‌ها را تخلیه کنید. سپس یکی از کره‌های باردار را مانند مرحله‌ی ۲ به دو آونگ تماس دهید. این بار نیز زاویه‌ی بین دو آونگ را اندازه‌گیری کنید.

۵ــ نتیجه‌ی مرحله‌های ۲ و ۴ را با یک‌دیگر مقایسه کنید. نتیجه را بنویسید و به کلاس گزارش دهید.

کولن نیز با انجام دادن آزمایش و اندازه‌گیری‌های دقیق به این نتیجه رسید که :

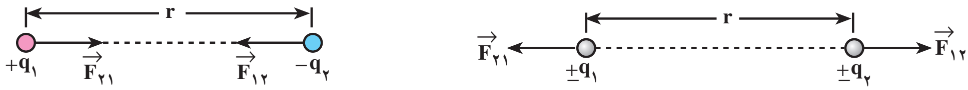
نیروی الکتریکی با حاصل‌ضرب اندازه‌ی بار دو ذره نسبت مستقیم دارد ؛ یعنی :

$$F \propto q_1 \cdot q_2$$

کولن، نتیجه‌ی آزمایش‌های خود را که امروزه به نام **قانون کولن** شناخته شده است ، به‌صورت زیر بیان کرد :

نیروی الکتریکی ربایشی یا رانشی بین دو ذره‌ی باردار q_1 و q_2 که در فاصله‌ی r از یک‌دیگر قرار دارند، با حاصل‌ضرب بار دو ذره نسبت مستقیم و با مجذور فاصله‌ی دو ذره از یک‌دیگر نسبت وارون دارد.

$$F \propto \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$



الف) نیروی الکتریکی بین دو بار الکتریکی همنام، رانشی است.

ب) نیروی الکتریکی بین دو بار الکتریکی غیرهمنام، ربایشی است.

شکل ۲ــ۴

در شکل ۲ــ۴ $\vec{F}_{12}$ به معنای نیرویی است که ذره‌ی اول به ذره‌ی دوم وارد می‌کند و $\vec{F}_{21}$ نیرویی است که ذره‌ی دوم به ذره‌ی اول وارد می‌کند.

نیروهای الکتریکی که دو ذره‌ی باردار به یک‌دیگر وارد می‌کنند، هم‌اندازه و در جهت‌های مخالف یک‌دیگرند (قانون سوم نیوتون). اگر اندازه‌ی این نیروها را با F نشان دهیم، داریم :

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \rightarrow F_{12} = F_{21} = F$$

قانون کولن را می‌توان با رابطه‌ی زیر بیان کرد :

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \qquad (۲ــ۱)$$

در این رابطه، q_1 و q_2 برحسب کولن، r برحسب متر و F برحسب نیوتون است. $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ ضریب تناسب است که در آن ضریب ε_0 یک ثابت جهانی است و **ضریب گذردهی الکتریکی خلأ** نام دارد.

$$\varepsilon_0 \simeq 8/85 \times 10^{-12} \quad \frac{C^2}{N.m^2}$$

برای سادگی در نوشتن، می‌توان ضریب قانون کولن را با نماد k نشان داد.

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \simeq 9 \times 10^9 \frac{N.m^2}{C^2}$$

به کمک قانون کولن (رابطه‌ی ۲ــ۱) می‌توان اندازه‌ی نیروی الکتریکی‌ای را که دو ذره‌ی باردار به یک‌دیگر وارد می‌کنند، محاسبه کرد. در محاسبه‌ها، علامت مثبت یا منفی بارهای الکتریکی را در رابطه‌ی ۲ــ۱ وارد نمی‌کنیم و ربایشی یا رانشی بودن نیروها را به کمک نوع بارها مشخص می‌کنیم.

مثال ۲ــ۱

دو ذره با بارهای الکتریکی $q_1 = +2\mu C$ و $q_2 = +5\mu C$ در فاصله‌ی ۳cm از یک‌دیگر ثابت شده‌اند. اندازه‌ی نیرویی که دو ذره به یک‌دیگر وارد می‌کنند و نوع آن را مشخص کنید.

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۲ــ۱ داریم:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{(2 \times 10^{-6}).(5 \times 10^{-6})}{9 \times 10^{-4}}$$

$$F = 100 N$$

چون بارهای الکتریکی دو ذره همنوع‌اند، نیرویی که دو ذره به یک‌دیگر وارد می‌کند، رانشی است.

اگر تعدادی ذره‌ی باردار در یک ناحیه از فضا قرار داشته باشند، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره، برایند نیروهایی است که هر یک از ذره‌های دیگر در غیاب سایر ذره‌ها، بر آن ذره وارد می‌کنند.

مثال ۲ـ۲

سه ذره با بارهای الکتریکی $q_1=+2/5\mu C$ ، $q_2=-1\mu C$ و $q_3=+4\mu C$ درنقطه‌های A و B و C مطابق شکل ۲ــ ۵ ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی وارد بر q_3 را محاسبه کنید. $AC=6cm$ و $BC=2cm$.



شکل ۲ــ ۵

حل: نیرویی که بر q_3 وارد می‌شود، برایند دو نیرویی است که از طرف q_1 و q_2 بر آن وارد می‌شوند. برای محاسبه‌ی این نیرو، نیرویی را که هر یک از بارهای q_1 و q_2 در غیاب دیگری، بر q_3 وارد می‌کند، محاسبه می‌کنیم. نیروی الکتریکی وارد بر q_3 ، برایند این دو نیروست (شکل ۲ــ۶). با استفاده از رابطه‌ی ۲ــ۱ داریم :

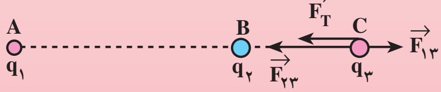
$$F=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q_1\cdot q_2}{r^2}$$

$$F_{13}=9\times10^{9}\times\frac{2/5\times4\times10^{-12}}{36\times10^{-4}}$$

$F_{13}=25N$ نیرویی که q_1 بر q_3 وارد می‌کند، رانشی است.

$$F_{23}=9\times10^{9}\times\frac{1\times4\times10^{-12}}{4\times10^{-4}}$$

$F_{23}=90N$ نیرویی که q_2 بر q_3 وارد می‌کند، ربایشی است.



شکل ۲ــ۶

مطابق شکل ۲ــ۶ نیروهای $\vec{F}_{13}$ و $\vec{F}_{23}$ در جهت‌های مخالف یک‌دیگرند. اندازه‌ی برایند آن‌ها، $\vec{F}_T$ ، برابر تفاضل اندازه‌های آن‌ها و در جهت نیروی بزرگ‌تر (در جهت $\vec{F}_{23}$) است.

$$\vec{F}_T=\vec{F}_{23}+\vec{F}_{13}$$

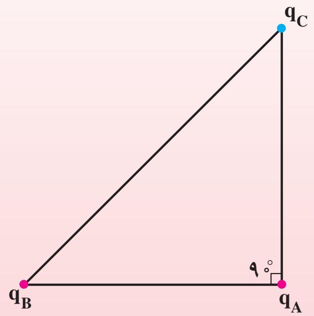
$$F_T=F_{23}-F_{13}=65N$$

تمرین ۲ــ۱

در مثال ۲ــ۲، نیروی وارد بر $q_۱$ را به‌دست آورید.

مثال ۲ــ۳

سه ذره‌ی باردار مطابق شکل ۲ــ۷ در سه رأس مثلث قائم‌الزاویه‌ی ABC ثابت شده‌اند. بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر ذره‌ی باردار واقع در رأس زاویه‌ی قائمه را محاسبه کنید ؛ در صورتی که $q_A = +۲\mu C$ ، $q_B = +۴\mu C$ ، $q_C = -۴\mu C$ ، $AB = ۳cm$ و $AC = ۲\sqrt{۳}cm$ باشد.



شکل ۲ــ۷

حل: نیروی بین q_A و q_B رانشی و بین q_A و q_C، ربایشی است. با استفاده از رابطه‌ی ۲ــ۱ داریم :

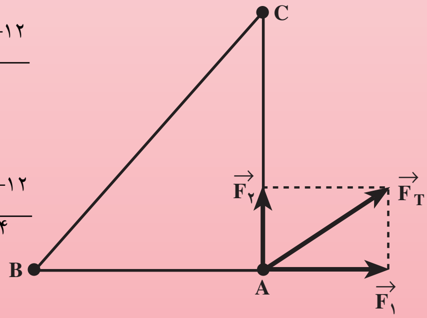
$$F = k\,\frac{q_۱ . q_۲}{r^۲}$$

$$F_{BA} = F_۱ = ۹\times۱۰^۹ \times \frac{۴\times۲\times۱۰^{-۱۲}}{۹\times۱۰^{-۴}}$$

$$F_۱ = ۸۰N$$

$$F_{CA} = F_۲ = ۹\times۱۰^۹ \times \frac{۴\times۲\times۱۰^{-۱۲}}{۱۲\times۱۰^{-۴}}$$

$$F_۲ = ۶۰N$$



شکل ۲ــ۸

نیروهای $\vec{F_۱}$ و $\vec{F_۲}$ در شکل ۲ــ ۸ نشان داده شده‌اند. این دو نیرو بر یک‌دیگر عمودند و $\vec{F_T}$ برایند آن‌هاست. داریم :

$$\vec{F_T} = \vec{F_۱} + \vec{F_۲}$$

$$F_T^۲ = F_۱^۲ + F_۲^۲$$

$$F_T^۲ = (۸۰)^۲ + (۶۰)^۲$$

$$F_T = ۱۰۰N$$

یادداشت ریاضی

برای حل کردن مسأله‌های فیزیک به محاسبه‌هایی نظیر محاسبه‌های برداری نیازمندیم که شما در کتاب‌های ریاضی سال‌های گذشته با آن‌ها آشنا شده‌اید. در این‌جا این محاسبه‌ها را صرفاً جهت حل مسأله‌های فیزیکی آورده‌ایم و جزء درس فیزیک منظور نمی‌شوند.

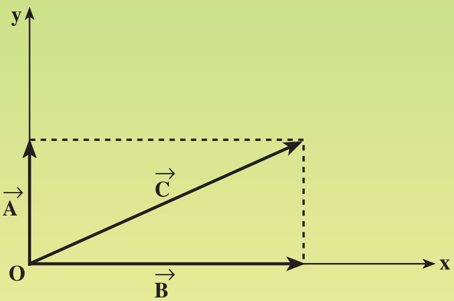
در کتاب ریاضی سال سوم راهنمایی و کتاب ریاضی ۲ دبیرستان با مؤلفه‌های یک بردار روی محورهای مختصات و نیز نمایش یک بردار برحسب مؤلفه‌ها و بردارهای یکّه و نیز محاسبه‌های برداری به کمک بردارهای یکّه آشنا شدید. در این‌جا با نحوه‌ی استفاده از آن‌ها در مبحث‌های فیزیک آشنا می‌شوید. مرور این مبحث، از کتاب ریاضی ۲ شما را در حل مسأله‌های فیزیکی یاری می‌دهد.

مؤلفه‌های یک بردار روی محورهای مختصات

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که در محاسبه‌ها می‌توان به‌جای دو بردار، ــ مثلاً بردارهای $\vec{A}$ و $\vec{B}$ در شکل ۲ــ ۹ــ برایند آن‌ها، یعنی بردار $\vec{C}$ را جایگزین کرد.

$$\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$$

$$C^۲ = A^۲ + B^۲$$



شکل ۲ــ۹ــ بردار $\vec{C}$ برایند بردارهای $\vec{A}$ و $\vec{B}$ است.

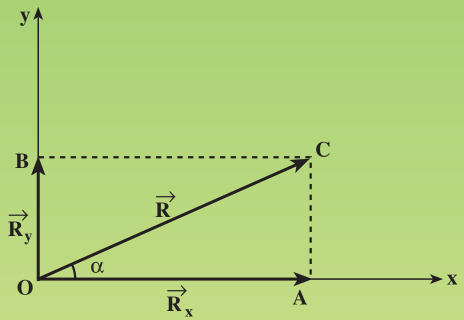
به‌طور وارون و هر جا که مناسب باشد، می‌توان به‌جای بردار $\vec{C}$، دو بردار $\vec{A}$ و $\vec{B}$ را به‌کار برد. در این صورت، به بردارهای $\vec{A}$ و $\vec{B}$، **مؤلفه‌های بردار $\vec{C}$** در امتداد محورهای x و y گفته می‌شود.

معمولاً مؤلفه‌ی یک بردار روی یک محور را با نام آن بردار و زیرنویس نام

محور، مشخص می‌کنند ؛ مثلاً مؤلفه‌ی بردار $\vec{C}$ در راستای محور x را $\vec{C}_x$ و مؤلفه‌ی آن در راستای محور y را $\vec{C}_y$ می‌نامیم.

برای تعیین مؤلفه‌های یک بردار روی دو محور x و y به روش زیر عمل می‌کنیم.

مطابق شکل ۲ــ۱۰ از انتهای بردار $\vec{R}$، خط‌هایی موازی هر یک از دو محور Oy و Ox رسم می‌کنیم تا محورها را در نقطه‌های A و B قطع کنند. بردارهای $\vec{OA}$ و $\vec{OB}$ مؤلفه‌های بردار $\vec{R}$ روی دو محورند که آن‌ها را $\vec{R}_x$ و $\vec{R}_y$ می‌نامیم.



شکل ۲ــ۱۰

اگر زاویه‌ی $\vec{R}$ با محور x برابر α باشد، اندازه‌ی مؤلفه‌های آن روی دو محور به روش زیر محاسبه می‌شود.

$$\cos\alpha = \frac{R_x}{R}$$

$$R_x = R\cos\alpha \qquad (۲ــ۲)$$

$$\sin\alpha = \frac{R_y}{R}$$

$$R_y = R\sin\alpha \qquad (۲ــ۳)$$

مثال ۱: بردار $\vec{A}$ به بزرگی ۵ واحد با محور x زاویه‌ی ۳۷ درجه می‌سازد. اندازه‌ی مؤلفه‌های آن را روی محورهای x و y به‌دست آورید.

حل: با استفاده از رابطه‌های ۲ــ۲ و ۲ــ۳ داریم :

$$A_x = A\cos\alpha$$

$$A_x = ۵\cos ۳۷^\circ$$

$A_x = ۵ \times ۰/۸ = ۴$ واحد

$A_y = A \sin \alpha$

$A_y = ۵ \sin ۳۷^\circ$

$A_y = ۵ \times ۰/۶ = ۳$ واحد

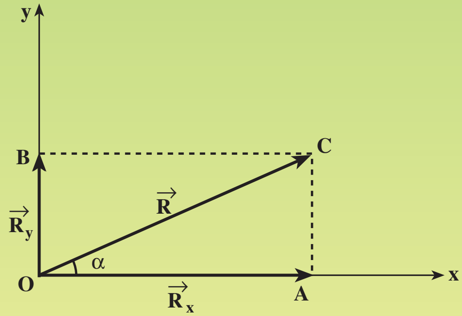
به‌طور وارون، بامعلوم بودن اندازه‌ی مؤلفه‌های یک بردار روی دو محور x و y، می‌توان اندازه و جهت بردار را معلوم کرد. جهت هر بردار را با تعیین زاویه‌ی آن بردار با جهت محور x مشخص می‌کنیم.

مثال ۲: بزرگی مؤلفه‌های بردار $\vec{R}$ روی محورهای x و y مطابق شکل ۲ــ۱۰ به ترتیب برابر ۸ و ۱۳/۹ واحد است. بزرگی این بردار و زاویه‌ی آن با محور x (جهت بردار $\vec{R}$) را تعیین کنید.

حل: با استفاده از شکل ۲ــ۱۱ در مثلث قائم‌الزاویه‌ی OAC، داریم :

$$R^۲ = R_x^۲ + R_y^۲ \qquad (۴ـ۲)$$

$R^۲ = (۸)^۲ + (۱۳/۹)^۲ \rightarrow R \simeq ۱۶$ واحد



شکل ۲ــ۱۱

اگر در شکل ۲ــ۱۱ تانژانت زاویه‌ی α را حساب کنیم، نتیجه می‌شود :

$$\tan \alpha = \frac{R_y}{R_x} \qquad (۵ـ۲)$$

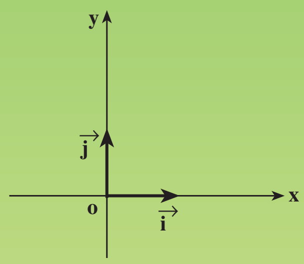
$$\tan \alpha = \frac{۱۳/۹}{۸} \simeq ۱/۷۳$$

$\alpha \simeq ۶۰^\circ$

نمایش یک بردار برحسب بردارهای یکّه

در کتاب‌های ریاضی سال سوم راهنمایی و ریاضی ۲ دبیرستان خواندید که با انتخاب بردارهای یکّه‌ی $\vec{i}$ و $\vec{j}$ به ترتیب روی محورهای x و y (شکل ۲ـ۱۲) می‌توان یک بردار را برحسب بردارهای یکّه نمایش داد. بردار یکّه در راستای هر محور، برداری است به طول واحد و در جهت همان محور.

$\left|\vec{i}\right| = \left|\vec{j}\right| = ۱$ واحد



شکل ۲ـ۱۲

اگر اندازه‌ی مؤلفه‌های بردار $\vec{A}$ روی محور x و y به ترتیب برابر A_x و A_y باشد، نمایش این بردار به کمک بردارهای یکّه به‌صورت رابطه‌ی زیر است.

$$\vec{A} = A_x\,\vec{i} + A_y\,\vec{j} \qquad (۲ـ۶)$$

مثال ۳: بردار $\vec{A}$ را در مثال ۱ برحسب بردارهای یکّه نشان دهید.

حل: از حل مثال ۱ نتیجه شد که $A_x = ۴$ و $A_y = ۳$ واحد است. با استفاده از رابطه‌ی (۲ـ۶) داریم :

$$\vec{A} = A_x\,\vec{i} + A_y\,\vec{j}$$

$$\vec{A} = ۴\,\vec{i} + ۳\,\vec{j}$$

محاسبه‌های برداری به کمک بردارهای یکّه

نمایش بردارها برحسب بردارهای یکّه به ما کمک می‌کند تا محاسبه‌های برداری ــ مثلاً محاسبه‌ی برایند چند بردار یا تفاضل دو بردار ــ را به سادگی انجام دهیم.

مثال ۴: برایند دو نیروی $\vec{F}_۱ = ۵\vec{i} - ۲\vec{j}$ و $\vec{F}_۲ = ۳\vec{i} + ۸\vec{j}$ نیوتونی برابر چند نیوتون است و با محور x چه زاویه‌ای می‌سازد؟

حل: با توجه به این‌که مؤلفه‌های بردارها روی یک محور، هم راستا هستند و برایند آن‌ها برابر جمع جبری آن‌هاست، داریم :

$$\vec{F} = \vec{F}_۱ + \vec{F}_۲$$

$$\vec{F} = (F_{۱x} + F_{۲x})\vec{i} + (F_{۱y} + F_{۲y})\vec{j}$$

$$\vec{F} = (۵ + ۳)\vec{i} + (-۲ + ۸)\vec{j}$$

$$\vec{F} = ۸\vec{i} + ۶\vec{j}$$

با استفاده از رابطه‌های ۲ـ۴ و ۲ـ۵ داریم :

$$F^۲ = F_x^۲ + F_y^۲$$

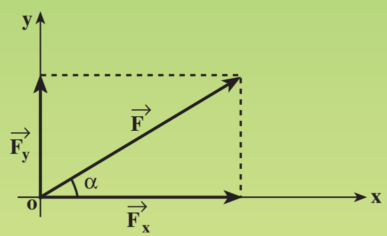
$$F^۲ = ۶۴ + ۳۶$$

$$F = ۱۰N$$

$$\tan\alpha = \frac{F_y}{F_x}$$

$$\tan\alpha = \frac{۶}{۸} = \frac{۳}{۴}$$

$$\alpha = ۳۷^\circ$$



شکل ۲ـ۱۳

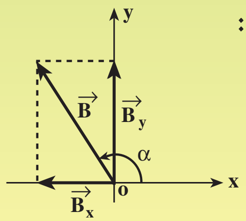
مثال ۵: اگر $\vec{A} = ۲\vec{i} - ۵\vec{j}$ واحد و $\vec{R} = -۳\vec{i} + ۴\vec{j}$ واحد و $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$ باشد، بردار $\vec{B}$ با محور x چه زاویه‌ای می‌سازد؟

حل:

$$\vec{R} = \vec{A} + \vec{B} \rightarrow \vec{B} = \vec{R} - \vec{A}$$

$$\vec{B} = (-۳\vec{i} + ۴\vec{j}) - (۲\vec{i} - ۵\vec{j})$$

$$\vec{B} = -۵\vec{i} + ۹\vec{j}$$



شکل ۲ـ۱۴

با استفاده از رابطه‌ی ۲ـ۵ داریم :

$$\tan\alpha = \frac{B_y}{B_x}$$

$$\tan\alpha = \frac{۹}{-۵} = -۱/۸$$

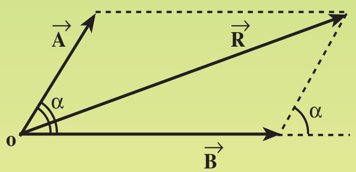
$$\alpha \cong ۱۲۰^\circ$$

توجه کنید که مؤلفه‌ی B_y مثبت و در جهت محور y و مؤلفه‌ی B_x منفی و در خلاف جهت محور x است. در نتیجه، انتهای بردار $\vec{B}$ در ربع دوم دستگاه مختصات قرار دارد.

محاسبه‌ی برایند دو بردار به روش متوازی‌الاضلاع

محاسبه‌ی برایند بردارها به روش متوازی‌الاضلاع، روش ساده‌ای است برای محاسبه‌ی اندازه‌ی برایند و نیز مشخص کردن جهت برایند دو بردار که در یک صفحه قرار دارند. این نوع محاسبه، در فیزیک کاربرد فراوان دارد.

این روش، در واقع همان روش ترسیمی (چند ضلعی) است. همان‌گونه که شکل ۲ــ۱۵ نشان می‌دهد، ابتدا دو بردار را از یک نقطه رسم می‌کنیم. این دو بردار را دو ضلع یک متوازی‌الاضلاع می‌گیریم و متوازی‌الاضلاع را با رسم دو ضلع دیگر آن کامل می‌کنیم. آن قطر متوازی‌الاضلاع که از محل تلاقی دو بردار می‌گذرد، نشان‌دهنده‌ی برایند دو بردار است.



شکل ۲ــ۱۵ــ برایند دو بردار، منطبق برقطر متوازی‌الاضلاعی است که روی دو بردار ساخته می‌شود.

اگر زاویه‌ی بین دو بردار برابر α باشد، اندازه‌ی برایند از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$$

$$R^۲ = A^۲ + B^۲ + ۲A.B.\cos\alpha \qquad (۲ـ۷)$$

مثال ۶: برایند دو بردار به بزرگی ۳ و ۵ واحد را که با یک‌دیگر زاویه‌ی ۶۰ درجه می‌سازند، محاسبه کنید.

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۲ـ۷ داریم :

$$R^۲ = A^۲ + B^۲ + ۲A.B.\cos\alpha$$

$$R^۲ = ۹ + ۲۵ + ۲ \times ۳ \times ۵ \cos ۶۰^\circ$$

$$R^۲ = ۴۹$$

$$R = ۷ \text{ واحد}$$

درحالت خاصی که دو بردار $\vec{A}$ و $\vec{B}$ هم‌اندازه باشند، رابطه‌ی ۲ـ۷ به‌صورت زیر ساده می‌شود.

$$A = B \rightarrow R^۲ = ۲A^۲(۱ + \cos\alpha)$$

در درس ریاضی دیده‌اید که «$۱ + \cos\alpha = ۲\cos^۲\frac{\alpha}{۲}$» است. در نتیجه، خواهیم داشت :

$$R^۲ = ۴A^۲\cos^۲\frac{\alpha}{۲}$$

$$R = ۲A\cos\frac{\alpha}{۲} \qquad (۲ـ۸)$$

مثال ۷: سرعت جسمی در دو لحظه‌ی $t_۱ = ۲s$ و $t_۲ = ۵s$ به ترتیب و برحسب $\frac{m}{s}$ به‌صورت $\vec{V}_۱ = ۱۴\vec{i} + ۷\vec{j}$ و $\vec{V}_۲ = ۲۶\vec{i} + ۱۶\vec{j}$ مشخص شده است. شتاب متوسط این جسم در بازه‌ی زمانی $\Delta t = t_۲ - t_۱$ چند $\frac{m}{s^۲}$ است؟

حل: در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه خواندید که شتاب متوسط برابر تغییرات سرعت جسم در واحد زمان است. تغییرات سرعت در یک بازه‌ی زمانی، برابر تفاضل برداری سرعت جسم در شروع و پایان آن بازه است ؛ بنابراین، داریم :

$$\Delta\vec{V} = \vec{V}_۲ - \vec{V}_۱$$

$$\Delta\vec{V} = (۲۶\vec{i} + ۱۶\vec{j}) - (۱۴\vec{i} + ۷\vec{j})$$

$$\Delta\vec{V} = ۱۲\vec{i} + ۹\vec{j}$$

با توجه به تعریف شتاب متوسط داریم :

$$\overline{\vec{a}} = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}$$

$$\overline{\vec{a}} = \frac{۱۲\vec{i} + ۹\vec{j}}{۵ - ۲}$$

$$\overline{\vec{a}} = ۴\vec{i} + ۳\vec{j}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۲ـ۴ نتیجه می‌شود :

$$\bar{a} = \sqrt{a_x^{۲} + a_y^{۲}}$$

$$\bar{a} = \sqrt{۱۶ + ۹}$$

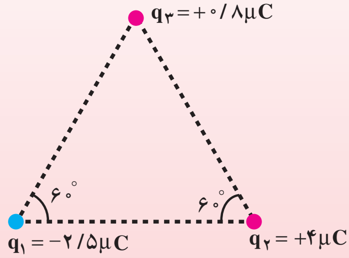
$$\bar{a} = ۵\,m/s^{۲}$$

اکنون به مثال‌های دیگری از نیروهای الکتریکی توجه کنید.

مثال ۲ـ۴

سه ذره‌ی باردار، مطابق شکل ۲ـ۱۶ در سه رأس مثلث متساوی‌الاضلاعی به‌ضلع ۶cm ثابت شده‌اند. بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر بار $q_۳$ را محاسبه کنید.

حل: نیروهای وارد بر بار $q_۳$ و برایند این نیروها در شکل ۲ـ۱۷ نشان داده شده است. با استفاده از رابطه‌ی ۲ـ۱ داریم:



شکل ۲ـ۱۶

$$F_{۱۳} = ۹\times۱۰^{۹}\times\frac{۲/۵\times۰/۸\times۱۰^{-۱۲}}{۳۶\times۱۰^{-۴}}$$

$F_{۱۳} = ۵N$ ربایشی

$$F_{۲۳} = ۹\times۱۰^{۹}\times\frac{۴\times۰/۸\times۱۰^{-۱۲}}{۳۶\times۱۰^{-۴}}$$

$F_{۲۳} = ۸N$ رانشی

اکنون با استفاده از رابطه‌ی ۲ـ۷، برایند دو نیرو را حساب می‌کنیم.

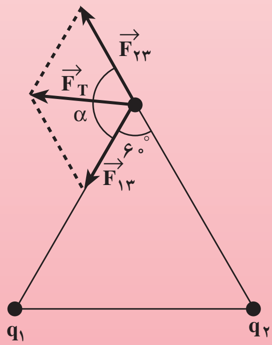
$$\vec{F}_T = \vec{F}_{۱۳} + \vec{F}_{۲۳}$$

$$F_T^۲ = F_{۱۳}^۲ + F_{۲۳}^۲ + ۲F_{۱۳}.F_{۲۳}.\cos\alpha$$

$$\alpha = ۱۸۰^\circ - ۶۰^\circ = ۱۲۰^\circ$$

$$F_T^۲ = ۲۵ + ۶۴ + ۲\times۵\times۸\times\cos۱۲۰^\circ$$

$$F_T^۲ = ۴۹ \rightarrow F_T = ۷N$$



شکل ۲ـ۱۷

تمرین ۲ـ۲

نیروهای وارد بر بارهای الکتریکی $q_۱$ و $q_۲$ را در مثال ۲ـ۴ محاسبه کنید.

مثال ۲ـ۵

مطابق شکل ۲ـ۱۸چهار بار الکتریکی در رأس‌های مربعی به ضلع ۶cm قرار دارند. نیروی الکتریکی وارد بر بار الکتریکی $q_۱$ را محاسبه کنید.

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۲ـ۱ داریم :

$$F_{۲۱}=۹\times۱۰^{۹}\times\frac{۳\times۴\times۱۰^{-۱۲}}{۳۶\times۱۰^{-۴}}$$

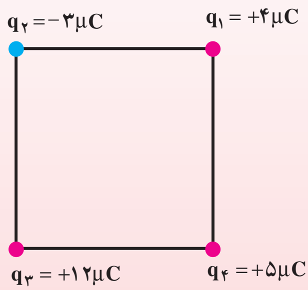
$F_{۲۱}=۳۰N$ ربایشی

$$F_{۳۱}=۹\times۱۰^{۹}\times\frac{۱۲\times۴\times۱۰^{-۱۲}}{۳۶\times۲\times۱۰^{-۴}}$$

$F_{۳۱}=۶۰N$ رانشی

$$F_{۴۱}=۹\times۱۰^{۹}\times\frac{۵\times۴\times۱۰^{-۱۲}}{۳۶\times۱۰^{-۴}}$$

$F_{۴۱}=۵۰N$ رانشی



شکل ۲ـ۱۸

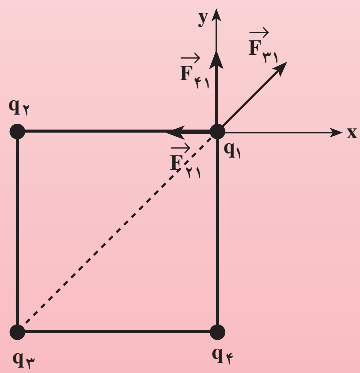
با انتخاب محورهای مختصات مطابق شکل ۲ـ۱۹ و استفاده از رابطه‌های ۲ـ۲ و ۲ـ۳ و ۲ـ۶ داریم :

$$\vec{F}_{۲۱}=-۳۰\,\vec{i}$$

$$\vec{F}_{۳۱}=(۶۰\cos۴۵^\circ)(\vec{i}+\vec{j})$$

$$\vec{F}_{۳۱}\simeq۴۲(\vec{i}+\vec{j})$$

$$\vec{F}_{۴۱}=۵۰\,\vec{j}$$



شکل ۲ـ۱۹

$$\vec{F}_T=\vec{F}_{۲۱}+\vec{F}_{۳۱}+\vec{F}_{۴۱}$$

$$\vec{F}_T=(-۳۰+۴۲)\,\vec{i}+(۴۲+۵۰)\,\vec{j}$$

$$\vec{F}_T=۱۲\,\vec{i}+۹۲\,\vec{j}$$

$$F_T=\sqrt{۱۲^۲+۹۲^۲}\simeq۹۲/۷N$$

تمرین ۲ـ۳

نیروی الکتریکی وارد بر q_4 را در مثال ۲ـ ۵ محاسبه کنید.

رابطه‌ی ۲ـ۱ برای محاسبه‌ی نیروی الکتریکی بین دو ذره‌ی باردار به کار می‌رود. محاسبه‌ی نیروی الکتریکی بین دو جسم باردار به چگونگی آرایش (یا توزیع) بار در دو جسم بستگی دارد و محاسبه‌ی آن نیازمند ریاضیات پیشرفته‌تری است. در این کتاب، همواره نیروهای بین دو ذره‌ی باردار را محاسبه می‌کنیم. روشن است که اگر فاصله‌ی جسم باردار از ذره‌ی باردار (یا جسم باردار دیگر) آن‌قدر زیاد باشد که ابعاد جسم در مقابل فاصله‌ی بین آن‌ها قابل چشم‌پوشی باشد، می‌توان جسم را مانند یک ذره‌ی باردار در نظر گرفت و از رابطه‌ی ۲ـ۱ برای محاسبه‌ی نیروی الکتریکی استفاده کرد.

فعالیت ۲ـ۱

اکنون که با قانون کولن و محاسبه‌ی نیروی الکتریکی آشنا شده‌اید، شایسته است آزمایش‌های کولن و چگونگی کار او را بیش‌تر بشناسید. در سال ۱۷۸۰ میلادی شارل کولن، دانشمند فرانسوی، با استفاده از وسیله‌ای که «ترازوی پیچشی» نام دارد، آزمایش‌هایی انجام داد. نتیجه‌ی آن‌ها به بیان قانون کولن منجر شد. در مورد آزمایش‌های کولن تحقیق کنید و شرح آزمایش‌ها و نتیجه‌گیری‌های او را به کلاس گزارش دهید.



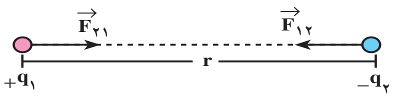
شکل ۲ـ۲۰ـ ترازوی پیچشی کولن

۲ـ۲ـ میدان الکتریکی

در بخش ۲ـ۱ دیدید که دو بار الکتریکی q_1 و q_2 که در فاصله‌ی r از یک‌دیگر واقع‌اند (شکل ۲ـ۲۱)، بر هم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند.

اگر دو آهن‌ربا در فاصله‌ی کمی از یک‌دیگر قرار گیرند، بر هم نیرو وارد می‌کنند. زمین و

خورشید نیز با وجود آن‌که میلیون‌ها کیلومتر از یک‌دیگر دورند، بر هم نیروی جاذبه‌ی گرانشی وارد می‌کنند.



شکل ۲ــ۲۱ ــ دو بار الکتریکی از فاصله‌ی r برهم نیرو وارد می‌کنند.

فعالیت ۲ـ۲

۱ــ یک آونگ الکتریکی بسازید و آن را از نقطه‌ای بیاویزید.

۲ــ آونگ را به روش القای الکتریکی یا تماس با جسم باردار دیگری باردار کنید.

۳ــ به یک میله‌ی پلاستیکی (یا شیشه‌ای) به کمک مالش با پارچه پشمی (یا ابریشمی) بار الکتریکی بدهید.

۴ــ میله را بدون تماس با آونگ از جهت‌های مختلف به آونگ نزدیک کنید و نتیجه‌ی آن‌چه را که مشاهده می‌کنید، به کلاس گزارش دهید.

فرض کنید کره‌ی باردار کوچکی با بار $+q$ مطابق شکل۲ــ۲۲ درنقطه‌ی A قرار دارد. اگر ذره‌ای با بار الکتریکی $+q'$ را در نقطه‌ی B قرار دهیم، از طرف بار $+q$ بر آن نیروی $\vec{F}$ وارد می‌شود (می‌دانید که بار q' نیز بر بار q نیرو وارد می‌کند که واکنش نیروی $\vec{F}$ است اما در شکل نشان داده نشده است).

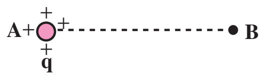


شکل ۲ــ۲۲



شکل ۲ــ۲۳

اکنون به این پرسش و نیز پاسخ آن بیندیشید : «اگر کره‌ی باردار q را از نقطه‌ی A برداریم (شکل ۲ــ۲۳) آیا درنقطه‌ی B بر بار ′q نیروی الکتریکی وارد می‌شود؟ پاسخ شما چیست؟ آیا قبول دارید که وجود بار q در نقطه‌ی A باعث می‌شود که بر بار ′q در نقطه‌ی B نیروی الکتریکی وارد شود؟ آیا می‌توانیم بگوییم که وقتی بار q را در نقطه‌ی A قرار می‌دهیم، در نقطه‌ی B خاصیتی ایجاد می‌شود که اگر بار q در A نباشد، این خاصیت نیز در B وجود نخواهد داشت؟ آیا وجود بار q در نقطه‌ی A، این خاصیت را فقط در نقطه‌ی B ایجاد کرده است یا اگر بار ′q را در هر نقطه‌ی دیگری در مجاورت نقطه‌ی A قرار دهیم، باز هم بر آن نیروی الکتریکی وارد می‌شود؟ مثلاً در فعالیتی که انجام دادید، اگر آونگ الکتریکی باردار را در هر نقطه‌ای مجاور میله‌ی باردار قرار دهید، آیا به آن نیروی الکتریکی وارد می‌شود؟



شکل ۲ــ۲۴

با توجه به آن‌چه گفته شد، **یک بار الکتریکی در هر نقطه از فضای اطراف خود، خاصیتی ایجاد می‌کند که به آن میدان الکتریکی می‌گویند.** اگر یک بار الکتریکی را در نقطه‌ای از میدان الکتریکی قرار دهیم، از طرف میدان بر آن نیروی الکتریکی وارد می‌شود. میدان الکتریکی به طور کمّی در بخش ۲ــ۳ تعریف شده است.

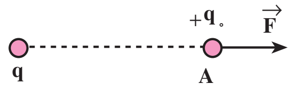
۲ــ۳ــ تعریف کمّی میدان الکتریکی

میدان الکتریکی به طور کمّی را به کمک نیرویی که میدان بر یک بار الکتریکی واقع در میدان وارد می‌کند، به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم :

نیروی وارد بر یکای بار الکتریکی مثبت را در هر نقطه، میدان الکتریکی در آن نقطه می‌نامیم.

اگر بار الکتریکی نقطه‌ای $+q_{\circ}$ مطابق شکل ۲ــ۲۵ در میدان الکتریکی حاصل از بار q قرار گیرد، از طرف میدان حاصل از بار q بر آن نیروی $\vec{F}$ وارد می‌شود. بر اساس تعریف بالا، میدان بار q در محل قرارگرفتن بار $+q_{\circ}$ که آن را با نماد $\vec{E}$ نشان می‌دهیم، از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{+q_{\circ}} \qquad (۲ــ۹)$$



شکل ۲ــ۲۵

میدان الکتریکی کمیتی برداری است و در محاسبه‌ها باید به این نکته توجه کرد. یکای میدان الکتریکی، نیوتون بر کولن $(\frac{N}{C})$ نام دارد.

مثال ۲ــ۶

بر بار الکتریکی $+۰/۲\mu C$ در یک نقطه از میدان بار q، نیروی $۵\times۱۰^{-۲}N$ وارد می‌شود. اندازه‌ی میدان الکتریکی را در این نقطه محاسبه کنید.

حل: از رابطه‌ی ۲ــ۹ می‌توان اندازه‌ی میدان الکتریکی را محاسبه کرد.

$$E=\frac{F}{q_{\circ}}$$

$$E=\frac{۵\times۱۰^{-۲}}{۲\times۱۰^{-۷}}$$

$$E=۲/۵\times۱۰^{۵}\frac{N}{C}$$

۲ــ۴ــ میدان الکتریکی حاصل از یک ذره‌ی باردار

می‌خواهیم میدان الکتریکی حاصل از بار ذره‌ای q را در نقطه‌ی A که به فاصله‌ی r از بار q است، محاسبه کنیم (شکل ۲ــ۲۶). برای این محاسبه از رابطه‌ی ۲ــ۹ استفاده می‌کنیم. اگر بار ذره‌ای $+q_{\circ}$ در نقطه‌ی A قرار گیرد، از طرف بار q به آن نیروی $\vec{F}$ وارد می‌شود. با استفاده از قانون کولن، بزرگی نیروی F را محاسبه می‌کنیم و با جای‌گذاری در رابطه‌ی ۲ــ۹، بزرگی میدان الکتریکی بار q را در نقطه‌ی A به‌دست می‌آوریم.

$$F=\frac{۱}{۴\pi\varepsilon_{\circ}}\frac{q.q_{\circ}}{r^{۲}}$$

$$E=\frac{F}{q_{\circ}}$$



شکل ۲ــ۲۶

$$E=\frac{۱}{۴\pi\varepsilon_{\circ}}\frac{q}{r^{۲}} \qquad (۲ــ۱۰)$$

رابطه‌ی ۲ــ۱۰ عامل‌های مؤثر بر بزرگی میدان الکتریکی حاصل از بار ذره‌ای q را مشخص

می‌کند. بنابراین رابطه، میدان با اندازه‌ی بار q نسبت مستقیم و با مجذور فاصله از آن، نسبت وارون دارد.

برای مشخص کردن جهت بردار میدان در یک نقطه ــ مثلاً نقطه‌ی A در شکل ۲ــ۲۶ــ، فرض می‌کنیم که بار الکتریکی مثبتی را در آن نقطه قرار داده‌ایم. میدان در آن نقطه، در جهت نیروی وارد بر این بار فرضی خواهد بود. بنابراین، میدان الکتریکی درهر نقطه، هم جهت با نیروی وارد بر بار الکتریکی مثبت واقع در آن نقطه است.

مثال ۲ــ۷

بزرگی میدان الکتریکی بار ذره‌ای $-۲\mu C$ را در نقطه‌ی M به فاصله‌ی الف) ۲ mm و ب) ۲۰cm از این بار الکتریکی محاسبه کنید و بردار میدان را در این نقطه برای یک حالت رسم کنید.

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۲ــ۱۰ اندازه‌ی میدان را در نقطه‌های خواسته شده، به‌دست می‌آوریم:

$$E = \frac{۱}{۴\pi\varepsilon_۰}\frac{q}{r^۲}$$

الف)

$$E_۱ = ۹\times۱۰^۹\times\frac{۲\times۱۰^{-۶}}{۴\times۱۰^{-۶}}$$

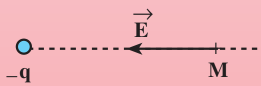
$$E_۱ = ۴/۵\times۱۰^۹\ \frac{N}{C}$$

ب)

$$E_۲ = ۹\times۱۰^۹\times\frac{۲\times۱۰^{-۶}}{۴\times۱۰^{-۲}}$$

$$E_۲ = ۴/۵\times۱۰^۵\ \frac{N}{C}$$

برای نشان دادن میدان، فرض می‌کنیم بار مثبتی در نقطه‌ی M، در ۲ میلی‌متری بار q واقع باشد. چون بار q منفی است، بار مثبت فرضی را جذب می‌کند. میدان بار q در جهت همین نیروست که در شکل ۲ــ۲۷ نشان داده شده است.



شکل ۲ــ۲۷ ــ میدان بار منفی q در نقطه‌ی M

همان‌طور که مثال‌های ۲ــ۶ و ۲ــ۷ نشان می‌دهند درمحاسبه‌ی اندازه‌ی میدان الکتریکی، علامت بار را در رابطه‌ی ۲ــ۹ یا ۲ــ۱۰ وارد نمی‌کنیم و جهت میدان در هرنقطه را به کمک جهت نیروی وارد بر بار الکتریکی مثبت فرضی واقع در آن نقطه، تعیین می‌کنیم.

میدان الکتریکی حاصل از مجموعه‌ی ذره‌های باردار: اگر در یک ناحیه از فضا چند ذره‌ی باردار قرار داشته باشند، در هر نقطه یک میدان الکتریکی وجود دارد. این میدان، برایند میدان‌هایی است که هر ذره‌ی باردار در غیاب سایر بارهای الکتریکی در آن نقطه ایجاد می‌کند.

مثال ۲ــ ۸

دو بار الکتریکی ذره‌ای $q_1 = +4\mu C$ و $q_2 = -6\mu C$ در فاصله‌ی ۸cm از یک‌دیگر ثابت شده‌اند. بزرگی میدان الکتریکی را در نقطه‌های زیر به‌دست آورید.

الف ــ در وسط خط واصل دو ذره‌ی باردار،

ب ــ در نقطه‌ای به فاصله‌ی ۲cm از بار q_2 و ۱۰cm از بار q_1 و روی خط واصل دوبار.

حل: در غیاب هر یک از دو ذره، میدان حاصل از بار دیگر را محاسبه می‌کنیم. میدانِ حاصل از مجموعه‌ی دوبار، برایند این دو میدان خواهد بود.

الف ــ اگر بار مثبتی را در نقطه‌ی A قرار دهیم، بار q_1 آن را می‌راند و بار q_2 آن را می‌رباید. بنابراین، $\vec{E}_1$ و $\vec{E}_2$ در نقطه‌ی A هم‌جهت و به سوی بار q_2 هستند (شکل ۲ــ۲۸ الف و ب).

با استفاده از رابطه‌ی ۲ــ۱۰ داریم :

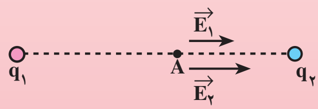
$$E = k\frac{q}{r^2}$$

$$E_1 = 9\times10^9 \times \frac{4\times10^{-6}}{16\times10^{-4}}\frac{N}{C}$$

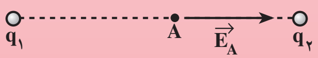
$$E_1 = 2/25\times10^7\frac{N}{C}$$

$$E_2 = 9\times10^9 \times \frac{6\times10^{-6}}{16\times10^{-4}}\frac{N}{C}$$

$$E_2 = 3/375\times10^7\frac{N}{C}$$



الف



ب

شکل ۲ــ۲۸

چون $\vec{E}_1$ و $\vec{E}_2$ هم‌جهت‌اند، اندازه‌ی برایند آن‌ها برابر مجموع اندازه‌ی آن‌هاست.

توجه داشته باشید که در نقطه‌ی A تنها میدان $\vec{E}_A$ وجود دارد.

$$\vec{E}_A = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$E_A = E_1 + E_2$$

$$E_A = ۵/۶۲۵ \times ۱۰^{۷} \frac{N}{C}$$

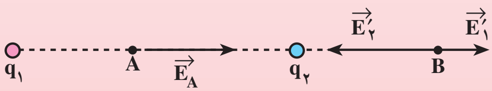
ب ــ اگر بار الکتریکی مثبتی در نقطه‌ی B قرار گیرد، بار q_1 آن را می‌راند و بار q_2 آن را می‌رباید. در نتیجه، $\vec{E}'_2$ به‌طرف بار q_2 و $\vec{E}'_1$ درخلاف جهت $\vec{E}'_2$ است (شکل ۲ــ۲۹ الف و ب).

$$E'_1 = ۹ \times ۱۰^{۹} \times \frac{۴ \times ۱۰^{-۶}}{۱۰^{-۲}}$$

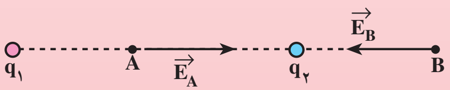
$$E'_1 = ۳/۶ \times ۱۰^{۶} \frac{N}{C}$$

$$E'_2 = ۹ \times ۱۰^{۹} \times \frac{۶ \times ۱۰^{-۶}}{۴ \times ۱۰^{-۴}}$$

$$E'_2 = ۱۳۵ \times ۱۰^{۶} \frac{N}{C}$$



الف



ب

شکل ۲ــ۲۹

چون $\vec{E}'_1$ و $\vec{E}'_2$ در خلاف جهت یک‌دیگرند، برایند آن‌ها برابر تفاضل اندازه‌های E'_1 و E'_2 است.

$$\vec{E}_B = \vec{E}'_2 + \vec{E}'_1$$

$$E_B = E'_2 - E'_1$$

$$E_B = ۱۳۱/۴ \times ۱۰^{۶} \frac{N}{C}$$

مثال ۲ـ۹

دو بار الکتریکی ذره‌ای $q_1 = -q_2 = +5\mu C$ در فاصله‌ی $8cm$ از یک‌دیگر ثابت شده‌اند. میدان الکتریکی را روی عمودمنصف خطی که دو ذره را به یک‌دیگر وصل می‌کند و به فاصله‌ی $3cm$ از وسط خط واصل دو ذره، به‌دست آورید. به مجموعه‌ی این دو بار الکتریکی، **دو قطبی الکتریکی** گفته می‌شود.

حل: میدان الکتریکی حاصل از این دو بار، در نقطه‌ی مذکور هم‌اندازه‌اند (شکل ۲ـ۳۰).

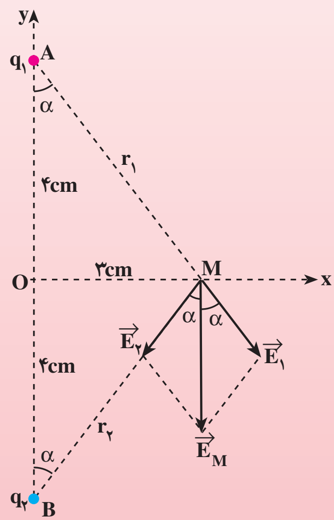
$$r_1 = r_2 = \sqrt{16+9} = 5\,cm$$

با استفاده از رابطه‌ی ۲ـ۱۰ داریم :

$$E = k\frac{q}{r^2}$$

$$E_1 = E_2 = 9\times10^{9}\times\frac{5\times10^{-6}}{25\times10^{-4}}\frac{N}{C}$$

$$E_1 = 1/8\times10^{7}\frac{N}{C}$$



شکل ۲ـ۳۰

چون $\vec{E}_1$ و $\vec{E}_2$ هم اندازه‌اند، با استفاده از رابطه‌ی ۲ـ۸ داریم :

$$E_1 = E_2$$

$$E_M = 2E_1\cos\frac{2\alpha}{2} = 2E_1\cos\alpha$$

با استفاده از مثلث قائم‌الزاویه‌ی AOM اندازه‌ی $\cos\alpha$ را حساب می‌کنیم :

$$\cos\alpha = \frac{OA}{AM} = \frac{4}{5} = 0/8$$

$$E_M = ۲ \times ۱/۸ \times ۱۰^{۷} \times ۰/۸$$

$$E_M = ۲/۸۸ \times ۱۰^{۷} \frac{N}{C}$$

شکل ۲ــ۳۰ نشان می‌دهد که میدان الکتریکی روی عمودمنصف دو قطبی، موازی محور دو قطبی (خط واصل دو ذره‌ی باردار) و در خلاف جهت محور y است ؛ یعنی، مؤلفه‌های $\vec{E}_۱$ و $\vec{E}_۲$ در امتداد محورx یک‌دیگر را خنثی می‌کنند.

تمرین ۲ــ۴

میدان الکتریکی حاصل از دو قطبی را در مثال **۲ــ۹** در نقطه‌ای روی محور دوقطبی و به فاصله‌ی ۵cm از مرکز دو قطبی (نقطه‌ی O در شکل ۲ــ۳۰) به‌دست آورید.

۲ــ۵ــ تجسّم میدان الکتریکی

میدان الکتریکی را در اطراف یک جسم باردار با خط‌هایی نشان می‌دهیم که به آن‌ها **خط‌های میدان الکتریکی** می‌گویند.

این خط‌ها دارای ویژگی‌های زیرند :

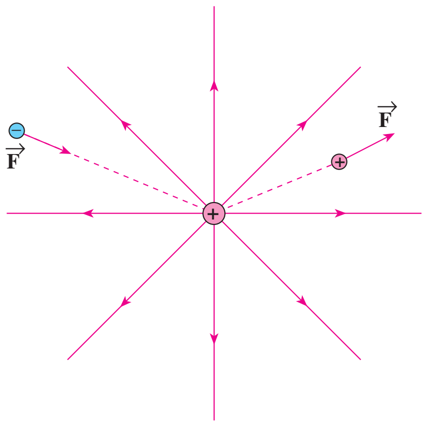
۱ــ خط‌های میدان در هر نقطه، هم‌جهت با نیروی وارد بر بار مثبت واقع در آن نقطه‌اند. درنتیجه، جهت این خط‌ها از بار مثبت رو به خارج و به سوی بار منفی است. (بر بار منفی، نیرو در خلاف جهت میدان وارد می‌شود.)

۲ــ خط میدان در هر نقطه،جهت میدان را در آن نقطه نشان می‌دهد و میدان در هر نقطه ، برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن هم جهت است .

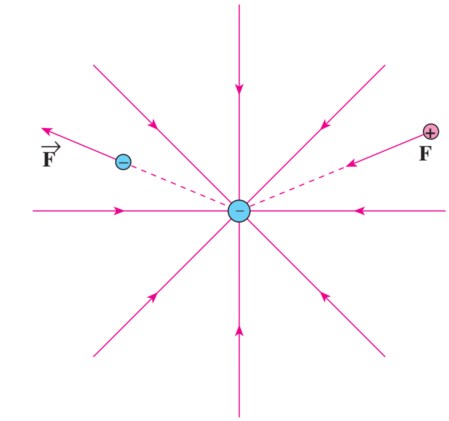
۳ــ در هر ناحیه که میدان قوی‌تر باشد، خط‌های میدان به یک‌دیگر نزدیک‌تر و فشرده‌ترند.

۴ــ خط‌های میدان یک‌دیگر را قطع نمی‌کنند، یعنی از هر نقطه فقط یک خط میدان می‌گذرد. به بیان دیگر، در هر نقطه‌ی فضا فقط یک میدان الکتریکی وجود دارد که همان میدان الکتریکی برایند است.

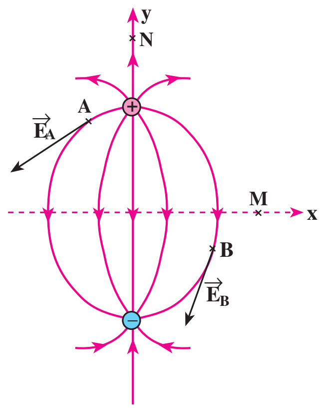
در شکل ۲ــ۳۱ خط‌های میدان الکتریکی را در اطراف چند جسم باردار الکتریکی مشاهده می‌کنید.



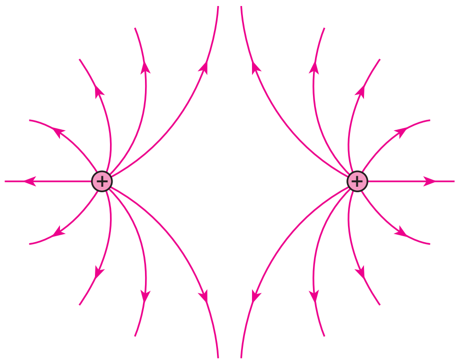
الف) بار مثبت منفرد



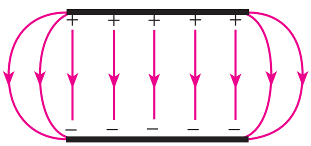
ب) بار منفی منفرد



پ) دو قطبی الکتریکی



ت) دوبار الکتریکی مثبت و هم‌اندازه



ث) میدان بین دو صفحه‌ی رسانای موازی با بارهای هم‌اندازه (میدان یکنواخت)

شکل ۲ــ۳۱ ــ میدان الکتریکی در اطراف چند جسم باردار

تمرین ۲ــ۵

میدان الکتریکی حاصل از بارهای مثبت و منفی و برایند آن‌ها را در نقطه‌های M و N در شکل ۲ــ۳۱ پ رسم کرده و با نتیجه‌ی مثال ۲ــ۹ و تمرین ۲ــ۴ مقایسه کنید.

فعالیت ۲ــ۳

۱ــ میدان الکتریکی را در اطراف دو بار الکتریکی منفی و هم‌اندازه رسم کنید.

۲ــ با توجه به ویژگی‌های خط‌های میدان الکتریکی، خط‌های میدان را در اطراف دو بار الکتریکی نقطه‌ای مثبت q_1 و منفی q_2 با فرض $|q_2|>|q_1|$، رسم کنید.

۳ــ بردار میدان الکتریکی را در چند نقطه روی شکلی که درمرحله‌ی ۲ رسم کرده‌اید، نشان دهید.

۴ــ نیروی وارد بر بار الکتریکی مثبت q' و نیز بار منفی q'' را که روی یک خط میدان واقع‌اند روی شکل مرحله‌ی ۲ رسم کنید.

۵ ــ با توجه به تعریف میدان الکتریکی و ویژگی‌خط‌های میدان و با رجوع به شکل۲ــ۳۱ ث برای میدان الکتریکی یکنواخت، تعریفی بیان کنید.

۲ــ۶ــ نیروی وارد بر بار الکتریکی در میدان الکتریکی

اگر بار الکتریکی q در میدان الکتریکی $\vec{E}$ قرار گیرد، از طرف میدان بر آن نیرو وارد می‌شود. این نیرو از رابطه‌ی ۲ــ۹ به‌دست می‌آید.

$$\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q}$$

$$\vec{F}=q.\vec{E} \qquad (۲ــ۱۱)$$

اگر q مثبت باشد، $\vec{F}$ و $\vec{E}$ هم‌جهت‌اند اما اگر q منفی باشد، $\vec{F}$ در خلاف جهت $\vec{E}$ خواهد بود.

مثال ۲ــ۱۰

ذره‌ای به جرم ۲g و بار الکتریکی ۲μC را در میدان الکتریکی خارجی $\frac{N}{C}$ ۴×۱۰

محاسبه کنید.

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۲ــ۱۱ داریم :

$$F=qE$$

$$F = 2\times10^{-6}\times4\times10^{4}$$

$$F = 8\times10^{-2}N$$

$$a = \frac{F}{m}$$

$$a = \frac{8\times10^{-2}}{2\times10^{-3}}$$

$$a = 40m/s^{2}$$

مثال‌های حل شده نشان می‌دهند که میدان الکتریکی در یک نقطه، به عامل‌های مختلفی بستگی دارد. اندازه‌ی بار الکتریکی، نحوه‌ی توزیع بار الکتریکی و فاصله‌ی نقطه‌ی موردنظر از جسم باردار، از جمله‌ی این عامل‌ها هستند.

۲ــ۷ــ توزیع بار الکتریکی در یک جسم

الف ــ جسم نارسانا: وقتی به یک جسم نارسانا بار الکتریکی داده می‌شود، بار در محل داده شده به جسم باقی می‌ماند و در جسم جابه‌جا نمی‌شود.

ب ــ جسم رسانا: بر خلاف جسم نارسانا، وقتی به یک جسم رسانا بار الکتریکی داده می‌شود، آن بار الکتریکی در محل داده شده ساکن نمی‌ماند و در جسم رسانا توزیع می‌شود. برای پی‌بردن به چگونگی توزیع بار در جسم رسانا، آزمایش۲ــ۳ را انجام دهید.

آزمایش ۲ـ۳

هدف: نحوه‌ی توزیع بار در جسم رسانا

وسیله‌های آزمایش: ظرف فلزی دردار با پایه‌ی نارسانا (شکل ۲ــ۳۲ الف)، گوی فلزی، نخ، الکتروسکوپ، چسب نواری، واندوگراف و یا میله‌ی پلاستیکی و پارچه‌ی پشمی.

شرح آزمایش:

۱ــ به کمک چسب نواری یک سر نخ را به گوی فلزی و سر دیگر آن را به در ظرف وصل کنید به طوری که طول نخ باقیمانده از عمق ظرف کم‌تر باشد (شکل ۲ــ۳۲ ب).

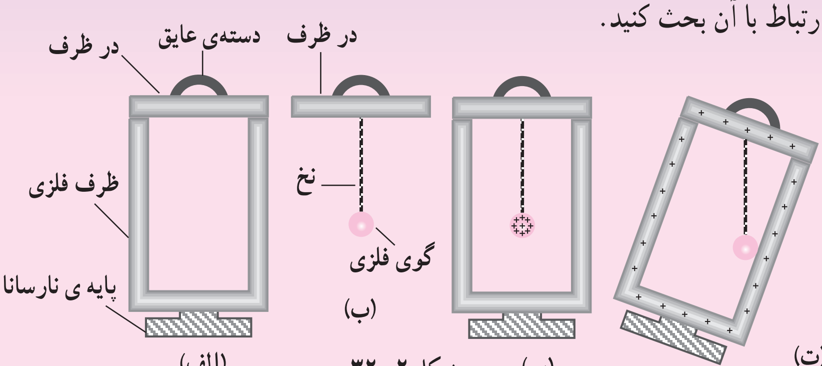
۲ــ گوی فلزی را توسط واندوگراف یا روش القا و یا روش‌های دیگر باردار

کنید و از باردار شدن آن پس از نزدیک‌کردن به کلاهک یک الکتروسکوپ بدون بار مطمئن شوید. (در این‌جا بار گوی فلزی را مثبت فرض کرده‌ایم).

۳ــ بدون آن که گوی باردار با دست شما یا بدنه‌ی ظرف تماس یابد در ظرف را به آرامی بر روی ظرف قرار دهید (شکل ۲ــ۳۲ پ).

۴ــ پایه‌ی نارسانای ظرف را بگیرید و آن را به نحوی کج کنید تا گوی فلزی باردار برای لحظه‌ای کوتاه با درون ظرف تماس یابد (شکل ۲ــ۳۲ ت).

۵ــ در ظرف را برداشته و گلوله و همچنین ظرف را دوباره به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک کنید. نتیجه‌ی مشاهده‌ی خود را به کلاس گزارش کرده و در ارتباط با آن بحث کنید.



شکل ۲ــ۳۲

آزمایش‌هایی مانند آن‌چه شما انجام دادید، نشان می‌دهد که بار الکتریکی درون جسم رسانا باقی نمی‌ماند. تمام بار الکتریکی داده شده به جسم رسانا به سطح خارجی آن می‌رود و در آن‌جا توزیع می‌شود.

فعالیت ۲ـ۴

در جسم رسانا، الکترون‌های آزاد می‌توانند جابه‌جا شوند. با بحث در گروه خود برای پرسش زیر، پاسخ مناسبی تهیه کنید و آن را به کلاس گزارش دهید.

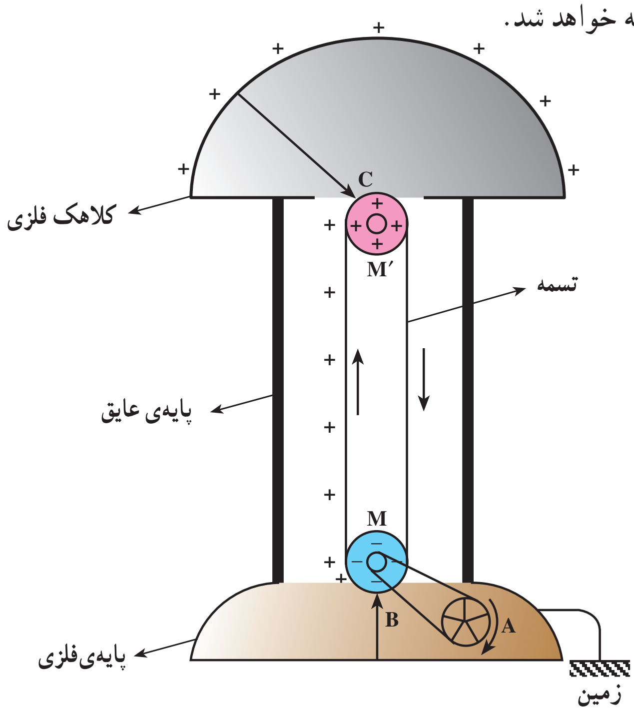
با توجه به این‌که در جسم جامد بارهای الکتریکی مثبت جابه‌جا نمی‌شوند، در این‌باره توضیح دهید : وقتی به یک جسم رسانا بار الکتریکی مثبت یا منفی داده می‌شود، این بارهای الکتریکی چگونه در جسم جابه‌جا شده و به سطح خارجی آن می‌روند؟

مطالعه‌ی آزاد

مولد وان‌دوگراف

مولد وان دوگراف دستگاهی است که بار الکتریکی روی کلاهک فلزی آن انباشته می‌شود. اگر یک جسم رسانا با کلاهک این دستگاه تماس پیدا کند، دارای بار الکتریکی می‌شود.

در نمونه‌ی ساده‌ی مولد وان‌دوگراف، غلتک M توسط موتور A می‌چرخد و تسمه روی دو غلتک چرخانده می‌شود. غلتک M از جنس پلی‌تن و M′ از جنس پرسپکس است. شانه‌ی فلزی B به پایه‌ی فلزی متصل است. دراثر مالش تسمه با غلتک‌ها، غلتک M بار منفی و غلتک M′ بار مثبت پیدا می‌کند. غلتک M که بار منفی دارد، در شانه‌ی فلزی B (که به زمین اتصال دارد)، بار مثبت القا می‌کند. بار مثبت توسط شانه‌ی B روی سطح بیرونی تسمه قرار داده می‌شود. این بارهای مثبت، توسط تسمه که عایق است به کمک شانه‌ی فلزی C به کلاهک منتقل شده و به سطح خارجی کلاهک می‌روند. به این ترتیب، بار الکتریکی مثبت روی سطح خارجی کلاهک انباشته می‌شود. اگر جای غلتک‌های M و M′ با هم عوض شود، بار منفی در سطح خارجی کلاهک انباشته خواهد شد.



شکل ۲ــ۳۳

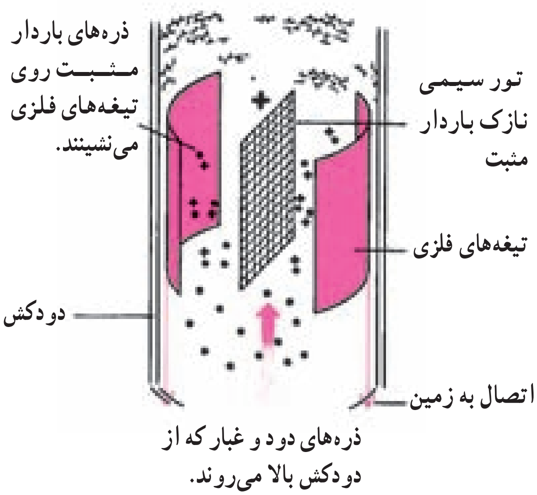
مطالعه‌ی آزاد

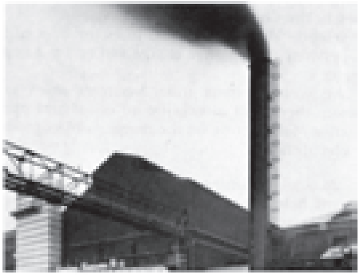
رسوب دهنده‌ی الکتروستاتیکی

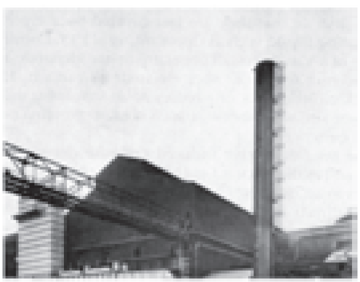
رسوب‌دهنده‌ی الکتروستاتیکی، دود و غبار را از گازهای زایدی که از دودکش کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها بالا می‌رود، جدا می‌سازد. شکل زیر چگونگی کار یک رسوب‌دهنده را نشان می‌دهد. توری سیمی را به مقدار زیاد باردار می‌کنند، به‌گونه‌ای که تخلیه‌ی الکتریکی پیوسته‌ای بین توری و تیغه‌های فلزی متصل به زمین روی دهد. این تخلیه، جریان پیوسته‌ای از یونها را به‌همراه دارد که خود را به ذره‌های غبار در گازی که از دودکش بالا می‌رود، متصل می‌کنند.

سپس ذره‌های باردار غبار از تور سیمی دفع شده و به سوی تیغه‌های متصل به زمین رانده می‌شوند و در آنجا رسوب می‌کنند. پس از مدتی این تیغه‌ها را با زدن ضربه می‌تکانند تا ذره‌های غبار و دود از دودکش پایین بریزد و در آنجا این ذره‌ها را جمع می‌کنند.

دودکش این کارخانه در هر دو عکس مورد بهره‌برداری است ولی در عکس پایین دستگاه رسوب‌دهنده‌ی الکتروستاتیکی کار می‌کند.







شکل ۲ــ۳۴

چگالی سطحی بار الکتریکی: دیدیم که بار الکتریکی داده شده به یک جسم رسانا، در سطح خارجی آن توزیع می‌شود. بنا به تعریف، **بار الکتریکی موجود در واحد سطح جسم را چگالی سطحی بار الکتریکی** می‌نامند.

اگر بار الکتریکی جسم برابر q و مساحت سطحی که بار روی آن توزیع شده A باشد، چگالی سطحی بار ــ که با نماد σ (سیگما) نشان داده می‌شود ــ از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma = \frac{q}{A} \qquad (۲\text{ـ}۱۲)$$

در .S.I بار الکتریکی بر حسب کولن و مساحت بر حسب مترمربع است. در نتیجه، یکای چگالی سطحی بار، کولن بر مترمربع خواهد بود.

مثال ۲ــ۱۱

الف ــ به یک کرهٔ رسانا به قطر ۲cm بار الکتریکی ۱۲۵μC داده شده است. چگالی سطحی بار کره را حساب کنید.

ب ــ اگر همین بار به کره‌ای به قطر ۲m داده شود، چگالی سطحی بار آن چه‌قدر می‌شود؟

حل:

الف ــ مساحت سطح خارجی کره‌ای به شعاع R از رابطهٔ $A = ۴\pi R^۲$ به‌دست می‌آید.

$$A = ۴\pi R^۲$$

$$R = \frac{d}{۲} = ۱cm = ۱۰^{-۲} m$$

$$A = ۴\pi \times ۱۰^{-۴} m^۲ = ۱/۲۵۶ \times ۱۰^{-۳} m^۲$$

با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱۲ داریم :

$$\sigma = \frac{q}{A}$$

$$\sigma = \frac{۱۲۵ \times ۱۰^{-۶}}{۱/۲۵۶ \times ۱۰^{-۳}} \simeq ۱۰^{-۱} \frac{C}{m^۲} = ۱۰^۵ \frac{\mu C}{m^۲}$$

ب ــ

$$\frac{\sigma_۲}{\sigma_۱} = \frac{A_۱}{A_۲} = (\frac{R_۱}{R_۲})^۲$$

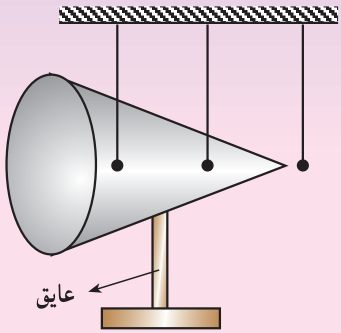
$$\frac{\sigma_۲}{۱۰^۵} = (\frac{۱}{۱۰۰})^۲$$

$$\sigma = ۱۰ \frac{\mu C}{m^۲}$$

آزمایش ۲ـ۴

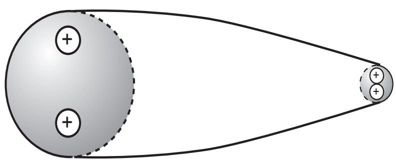
وسیله‌های آزمایش: مولد وان‌دوگراف یا دستگاه مشابه دیگر، مخروط فلزی روی پایه‌ی نارسانا، چند آونگ الکتریکی.

شرح آزمایش: مطابق شکل زیر، چند آونگ الکتریکی را در اطراف مخروط فلزی و در تماس با آن قرار دهید. با اتصال وان‌دوگراف به مخروط، به آن بار الکتریکی بدهید. انحراف آونگ‌ها را مشاهده کرده و با هم مقایسه کنید.



شکل ۲ـ۳۵

در جسمی مانند کره که سطح خارجی آن متقارن است، چگالی سطحی بار در همه‌جای آن یکسان است اما در جسم‌هایی که سطح خارجی متقارن ندارند، چگالی سطحی بار در همه‌جای سطح خارجی یکسان نیست. تجربه نشان می‌دهد که در مکان‌های برجسته و نوک‌تیز جسم رسانا، چگالی سطحی بار از سایر مکان‌های دیگر جسم بیش‌تر است. یعنی، فاصله‌ی بارهای داده شده به جسم، در مکان‌های نوک‌تیز کم‌تر از فاصله‌ی آن‌ها در مکان‌های پهن است. شکل ۲ـ۳۶ به‌گونه‌ای طرح‌وار نشان دهنده‌ی این مطلب است.



شکل ۲ـ۳۶

۲ــ ۸ ــ انرژی پتانسیل الکتریکی

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه با انرژی پتانسیل گرانشی آشنا شدید و دیدید که با صرف انرژی و انجام کار، می‌توان جسمی به جرم m را از سطح زمین تا ارتفاع h بالا برد. انرژی‌ای که صرف بالابردن جسم (با سرعت ثابت) شده است، به‌صورت انرژی پتانسیل گرانشی $(U = mgh)$ در آن ذخیره می‌شود. با انرژی پتانسیل کشسانی نیز آشنا شدید و دیدید که وقتی فنری را به آرامی فشرده می‌کنیم یا می‌کشیم، کار انجام شده به‌صورت انرژی پتانسیل کشسانی در فنر ذخیره می‌شود. در این‌جا می‌خواهیم با انرژی پتانسیل الکتریکی بیش‌تر آشنا شویم.

در بخش ۲ــ۱ دیدید که دو ذره‌ی باردار بر یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. همان‌طور که در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم، وقتی دو ذره‌ی باردار را که بار هم‌نام دارند با سرعت ثابت به یک‌دیگر نزدیک می‌کنیم، برای غلبه بر نیروی رانشی آن‌ها باید کار انجام دهیم و یا اگر بخواهیم دو ذره‌ی باردار را که بار غیرهم‌نام دارند با سرعت ثابت از هم دور کنیم، باز هم باید کار انجام دهیم. کار انجام شده به‌صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در بارهای الکتریکی ذخیره می‌شود.

مثال ۲ــ۱۲

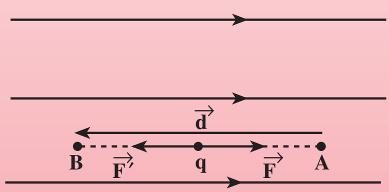
ذره‌ای با بار الکتریکی مثبت q را با سرعت ثابت در میدان الکتریکی یکنواخت (یعنی میدانی که بردار میدان در همه‌جای آن یکسان است، $\vec{E}$) در خلاف جهت میدان و به موازات خط‌های میدان به اندازه‌ی d جابه‌جا می‌کنیم. برای این جابه‌جایی، چه مقدار کار باید انجام دهیم؟

حل: میدان الکتریکی بر بار مثبت q، نیرویی برابر $F = qE$ و در جهت میدان وارد می‌کند. برای آن‌که ذره‌ی q را با سرعت ثابت در خلاف جهت میدان جابه‌جا کنیم، باید به آن نیرویی برابر $F' = qE$ و درخلاف جهت میدان ــ یعنی در جهت جابه‌جایی ــ وارد کنیم (شکل ۲ــ۳۷). بنابراین، زاویه‌ی بین نیرویی که ما وارد می‌کنیم (یعنی نیروی $\vec{F'}$) و جابه‌جایی $(\vec{d})$ برابر صفر است. کاری که ما انجام می‌دهیم، برابر است با:

$$W = F'.d.\cos\alpha$$

$$W = q.E.d.\cos(0)$$

$$W = q.E.d$$



شکل ۲ــ۳۷

در این‌جا، کاری که ما انجام می‌دهیم مثبت است و انرژی مصرفی ما به‌صورت انرژی پتانسیل الکتریکی، در بار الکتریکی q ذخیره می‌شود. هرچه اندازه‌ی جابه‌جایی بیش‌تر باشد، کار و انرژی مصرفی ما بیش‌تر می‌شود و در نتیجه، افزایش انرژی پتانسیل الکتریکی بار q، بیش‌تر می‌شود. درست مانند وقتی که یک جسم را روی زمین، از یک نقطه به نقطه‌ی بالاتری می‌بریم و انرژی پتانسیل گرانشی آن افزایش می‌یابد.

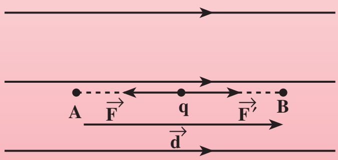
اگر بار الکتریکی q را در نقطه‌ی B (شکل ۲ــ۳۸) رها کنیم، در جهت خط‌های میدان به حرکت درمی‌آید و انرژی پتانسیل الکتریکی آن به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. مانند وقتی که یک جسم را از نقطه‌ی بالای زمین رها می‌کنیم و جسم به پایین حرکت می‌کند. در این حالت، انرژی پتانسیل گرانشی آن کاهش می‌یابد و به‌انرژی جنبشی تبدیل می‌شود.

مثال ۲ــ۱۳

بار الکتریکی منفی q را در میدان الکتریکی یکنواختی به بزرگی E با سرعت ثابت و در جهت میدان به اندازه‌ی d جابه‌جا می‌کنیم. کاری را که در این جابه‌جایی انجام می‌شود، محاسبه کنید.

حل: میدان الکتریکی، نیرویی به اندازه‌ی $F = q.E$ در خلاف جهت میدان به بارالکتریکی منفی وارد می‌کند. در نتیجه، برای جابه‌جایی بار q با سرعت ثابت باید نیروی $F' = q.E$ در جهت میدان ، یعنی در جهت جابه‌جایی، به آن وارد کنیم (شکل ۲ــ ۳۸). کار انجام شده توسط ما در این جابه‌جایی برابر است با :

$$W = F'.d.\cos\alpha \rightarrow W = q.E.d$$



شکل ۲ــ۳۸

در این مثال نیز کار انجام شده توسط ما مثبت است و انرژی مصرفی به‌صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در بار q ذخیره می‌شود. اگر بار q را رها کنیم، در خلاف جهت میدان شروع به حرکت می‌کند. در این‌حال، انرژی پتانسیل الکتریکی آن کاهش می‌یابد و به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود.

از مثال‌های ۲ــ۱۲ و ۲ــ۱۳ چنین نتیجه می‌گیریم که تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک بار الکتریکی وقتی آن را در یک میدان الکتریکی جابه‌جا می‌کنیم، برابر انرژی‌ای است که برای جابه‌جایی

آن بار الکتریکی صرف می‌شود.

$$\Delta U = W \qquad (۱۳_۲)$$

اگر کاری که ما برای جابه‌جایی بار الکتریکی (با سرعت ثابت) انجام می‌دهیم مثبت باشد ($W > 0$)، انرژی پتانسیل بار، افزایش می‌یابد ؛ یعنی، $\Delta U > 0$ و $U_2 > U_1$ می‌شود. درصورتی که کار انجام شده توسط ما منفی باشد ($W < 0$)، انرژی پتانسیل بار الکتریکی کاهش می‌یابد ؛ یعنی، $\Delta U < 0$ و $U_2 < U_1$ است.

۲ــ۹ــ اختلاف پتانسیل الکتریکی

در بخش ۲ــ ۸ دیدید که بارالکتریکی در میدان الکتریکی، دارای انرژی پتانسیل الکتریکی است. در یک نقطه‌ی میدان، اندازه‌ی انرژی پتانسیل الکتریکی باری واقع در آن نقطه، به‌اندازه‌ی بارالکتریکی بستگی دارد. هرچه اندازه‌ی بار الکتریکی بیش‌تر باشد، انرژی پتانسیل الکتریکی آن نیز بیش‌تر می‌شود. در مبحث الکتریسیته، معمولاً به‌غیر از انرژی پتانسیل، مفهوم دیگری نیز تعریف می‌شود که کاربرد عملی آن بیش‌تر است و به آن **پتانسیل الکتریکی** می‌گویند. با این کمیت در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه آشنا شدید و دیدید که **اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو نقطه عامل شارش بار الکتریکی بین آن دو نقطه است.** هم‌چنین، در همان کتاب دیدید که اگر دو ظرف آب به یک‌دیگر مربوط شوند، آب از ظرفی که انرژی پتانسیل گرانشی یکای جرم آن بیش‌تر است، به ظرف دیگر شارش می‌کند. در الکتریسیته نیز عامل شارش بار الکتریکی به کمک اختلاف انرژی پتانسیل الکتریکی بار در دو نقطه به‌صورت زیر تعریف می‌شود :

اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه، برابر تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یکای بار الکتریکی مثبت است، وقتی یکای بار از نقطه‌ی اول تا نقطه‌ی دوم جابه‌جا می‌شود.

بنابراین، اگر انرژی پتانسیل الکتریکی بار مثبت q در یک نقطه‌ی میدان برابر U_1 و در نقطه‌ی دیگر برابر U_2 باشد، اختلاف پتانسیل الکتریکی بین این دو نقطه ، که با نماد ΔV نشان داده می‌شود، از رابطه‌ی ۲ــ۱۴ به‌دست می‌آید :

$$\Delta V = V_2 - V_1 \quad \text{و} \quad \Delta U = U_2 - U_1$$

با توجه به تعریف اختلاف پتانسیل الکتریکی، داریم :

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} \qquad (۱۴_۲)$$

در این رابطه، U بر حسب ژول (J)، q بر حسب کولن (C) و V برحسب ولت (V) است.

در بخش۲ــ۸ دیدید که اگر بار الکتریکی مثبت در جهت میدان الکتریکی حرکت کند، انرژی پتانسیل الکتریکی آن کاهش می‌یابد. تغییر پتانسیل الکتریکی به تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بستگی دارد (رابطه‌ی ۲ــ۱۴) ؛ بنابراین، نتیجه می‌گیریم که **هرگاه بار الکتریکی مثبت در جهت میدان الکتریکی جابه‌جا شود، از پتانسیل الکتریکی بیش‌تر به پتانسیل الکتریکی کم‌تر رفته است.**

شما با انواع پیل (قوّه) که در وسیله‌های الکتریکی نظیر چراغ‌قوه یا رادیو از آن‌ها استفاده می‌شود و نیز با باتری خودرو آشنایی دارید. پیل‌ها معمولاً ۱/۵ ولتی، ۴/۵ ولتی یا ۹ ولتی‌اند. باتری خودروهای سواری معمولاً ۱۲ ولتی و باتری کامیون‌ها ۲۴ولتی یا بیش‌تراند. هر پیل یا باتری دوپایانه دارد که یکی مثبت و دیگری منفی است. وقتی می‌گوییم باتری خودرو ۱۲ ولت است، یعنی اختلاف پتانسیل الکتریکی بین پایانه‌های منفی و مثبت آن برابر ۱۲ ولت است. اگر پتانسیل پایانه‌ی منفی را با V_- و پتانسیل پایانه‌ی مثبت را با V_+ نشان دهیم، داریم :

$$\Delta V = V_+ - V_- = ۱۲V$$

$$V_+ = ۱۲ + V_-$$

بنابراین، پتانسیل پایانه‌ی مثبت به اندازه‌ی ۱۲ ولت از پتانسیل پایانه‌ی منفی آن بیش‌تر است. مثلاً اگر پتانسیل پایانه‌ی منفی را برابر ۴V− یا ۴V+ فرض کنیم، پتانسیل پایانه‌ی مثبت به ترتیب برابر ۸V+ یا ۱۶V+ خواهد شد. ممکن است پتانسیل پایانه‌ی منفی را برابر صفر بگیریم، در این صورت، پتانسیل پایانه‌ی مثبت برابر ۱۲V+ می‌شود. معمولاً (به‌خصوص در مهندسی برق) پتانسیل زمین را برابر صفر می‌گیرند و پتانسیل نقطه‌های دیگر را نسبت به زمین می‌سنجند. در این‌صورت، پتانسیل هر جسم رسانا که به زمین وصل شود، برابر صفر می‌شود. مثلاً اگر پایانه‌ی منفی باتری را به زمین وصل کنیم، پتانسیل پایانه‌ی مثبت آن برابر ۱۲+ ولت می‌شود. در هر حال، نکته‌ی مهم، اختلاف پتانسیل بین دو نقطه است که در محاسبه‌ها وارد می‌شود.

تمرین ۲ ــ ۶

اگر پایانه‌ی مثبت یک باتری ۱۲ ولتی را به زمین وصل کنیم، پتانسیل پایانه‌ی منفی آن چند ولت خواهد شد؟

مثال ۲ــ۱۴

اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری یک خودرو برابر ۱۲V است. اگر

بار الکتریکی ۱/۵+ کولن از پایانه‌ی مثبت تا منفی باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۲ــ۱۴ داریم :

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q}$$

$$\Delta U = q.\Delta V = q.(V_{-} - V_{+})$$

$$\Delta U = ۱/۵ \times (-۱۲) = -۱۸J$$

بنابر این، انرژی پتانسیل الکتریکی این بار به اندازه‌ی ۱۸J کاهش یافته است.

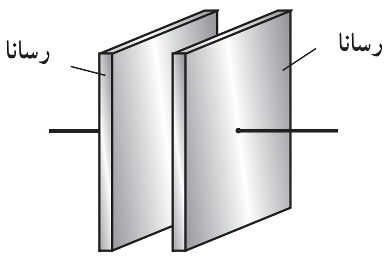
تمرین ۲ــ۷

اگر بار الکتریکی جابه‌جا شده در مثال ۲ــ۱۴ منفی باشد، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟

۲ــ۱۰ــ خازن

خازن یک قطعه‌ی الکتریکی است که می‌تواند مقداری بار الکتریکی و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند و هر زمان که لازم باشد، آن را در مدار تخلیه کند. هر خازن از دو رسانا که به یک‌دیگر اتصال الکتریکی ندارند، تشکیل می‌شود.

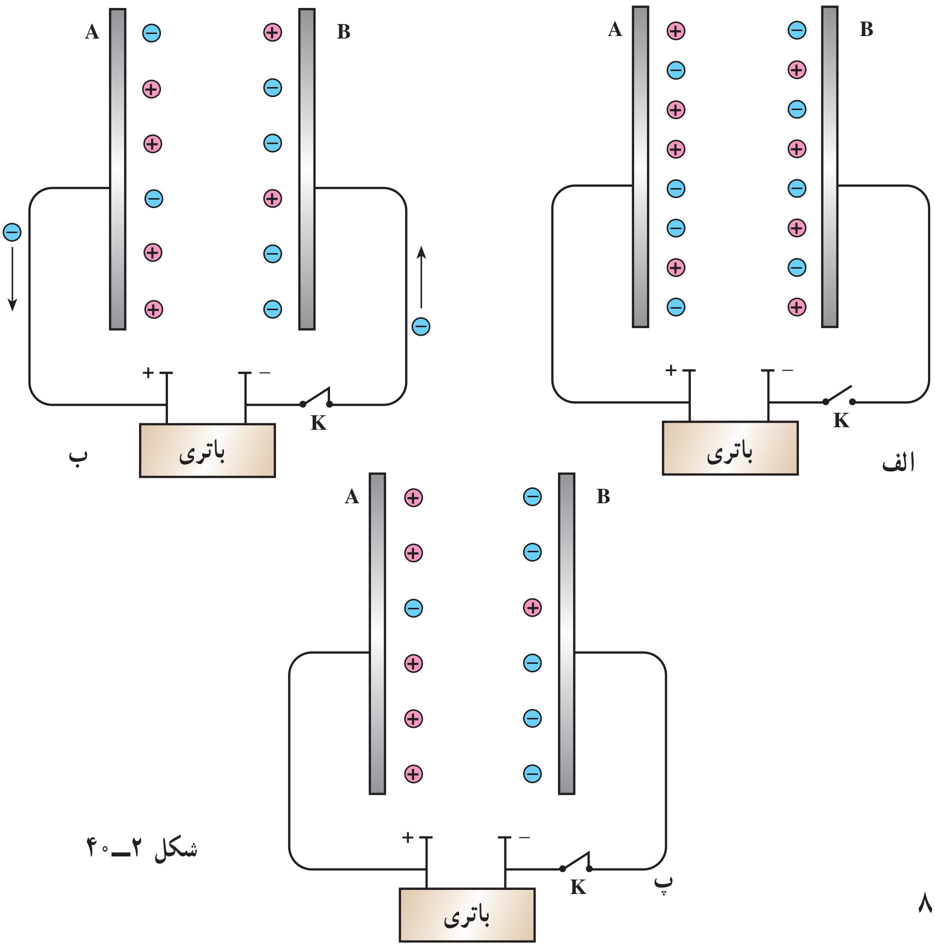
خازن را به شکل‌های مختلف و برای مصرف‌های متفاوتی می‌سازند. در مدار لامپ‌های مهتابی (فلوئورسنت)، بلندگو،دلکوی ماشین، رادیو، تلویزیون، رایانه و ... از خازن استفاده می‌شود. برای آشنا شدن با چگونگی عمل خازن در مدار، ساده‌ترین شکل خازن را بررسی می‌کنیم. به این خازن، **خازن تخت** یا **مسطح** گفته می‌شود. رساناهای خازن تخت، دو صفحه‌ی فلزی موازی یک‌دیگرند. به همین دلیل به این خازن، **خازن با صفحه‌های موازی** نیز گفته می‌شود. خازن تخت را در مدارها با نماد «⊣⊢» نشان می‌دهیم.



شکل ۲ــ۳۹ــ خازن تخت

ذخیره‌ی بار الکتریکی در خازن : وقتی به یک خازن مقداری بارالکتریکی داده شود، می‌گوییم در خازن بارالکتریکی ذخیره شده است. برای ذخیره‌ی بارالکتریکی در خازن، به مولدی مانند یک باتری نیاز است. ابتدا دو صفحه‌ی خازن را مطابق شکل ۲ـ۴۰ الف با سیم‌های رابط و یک کلید به پایانه‌های مولد وصل می‌کنیم. با بستن کلید، باتری بارالکتریکی «$-q$» را روی صفحه‌ی متصل به پایانه‌ی منفی انباشته می‌کند. بار «$-q$»، بار الکتریکی «$+q$» را روی صفحه‌ی مقابل القا می‌کند. بارهای منفی رانده شده از این صفحه، به مولد برمی‌گردند. برای روشن شدن موضوع به سازوکار ذخیره‌ی بار در خازن می‌پردازیم.

همان‌گونه که در شکل ۲ـ۴۰ الف به صورت طرح وار نشان داده شده است، در هر یک از صفحه‌های خازن، بارهای مثبت و منفی وجود دارد. وقتی کلید (K) را وصل می‌کنیم، به علت وجود اختلاف پتانسیل الکتریکی بین هر پایانه، با صفحه‌ی رسانای متصل به آن، بارهای الکتریکی شروع به جابه‌جا شدن می‌کنند (شکل ۲ـ۴۰ ب). چون در رساناهای فلزی الکترون‌های آزاد می‌توانند جابه‌جا



شکل ۲ـ۴۰

شوند، باتری با مصرف کردن انرژی هر دو صفحه را باردار می‌کند. از پایانه‌ی منفی، تعدادی الکترون به صفحه‌ی B منتقل می‌شود؛ در حالی که پایانه‌ی مثبت باتری از صفحه‌ی A الکترون می‌گیرد. جابه‌جایی بارهای الکتریکی آن‌قدر ادامه می‌یابد تا پتانسیل الکتریکی هر یک از صفحه‌های خازن با پتانسیل پایانه‌ی متصل به آن برابر شود. به این ترتیب، اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی خازن (که به آن اختلاف پتانسیل دو سر خازن می‌گوییم) با اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های باتری برابر می‌شود (شکل ۲ــ۴۰ پ).

$V_A = V_+$ و $V_B = V_-$

$$V_A - V_B = V_+ - V_- \quad (۲ــ۱۵)$$

در نتیجه، هر یک از صفحه‌های خازن دارای بار الکتریکی می‌شود. روی صفحه‌ی A بار $+q$ و روی صفحه‌ی B، بار $-q$ انباشته می‌شود. در این حالت، می‌گوییم که بار الکتریکی q در خازن ذخیره شده است. در واقع، باتری با صرف انرژی، بار q را در خازن ذخیره کرده است. انرژی‌ای که باتری مصرف کرده، به‌صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در خازن ذخیره شده است. اکنون، خازن دارای بار الکتریکی و انرژی است.

۲ــ۱۱ــ ظرفیت خازن

آزمایش نشان می‌دهد که هرچه اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های مولد بیش‌تر باشد، بار ذخیره‌شده در خازن نیز بیش‌تر می‌شود. به عبارتی نسبت بار الکتریکی خازن (q) به اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی آن (V)، یعنی نسبت $\frac{q}{V}$، در آزمایش‌های مختلف ثابت می‌ماند. این نسبت را که به اندازه‌ی بار الکتریکی خازن و نیز به اختلاف پتانسیل دو سر آن بستگی ندارد، با نماد «C» نشان می‌دهیم و به آن **ظرفیت خازن** می‌گوییم. بنابراین، **ظرفیت خازن برابر نسبت بار ذخیره‌شده در آن به اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی آن است.**

$$C = \frac{q}{V} \quad (۲ــ۱۶)$$

به پاس خدمات مایکل فارادی، دانشمند انگلیسی، یکای ظرفیت **فاراد** نامیده شده است.

در رابطه‌ی ۲ــ۱۶ بار الکتریکی بر حسب کولن، اختلاف پتانسیل بر حسب ولت و ظرفیت برحسب فاراد (F) است. فاراد یکای بسیار بزرگی است و ظرفیت خازن‌های تخت از حدود چند میکروفاراد تجاوز نمی‌کند.

مثال ۲ـ۱۵

صفحه‌های خازن تختی را به پایانه‌های مولدی به اختلاف پتانسیل ۲۴V وصل می‌کنیم. اگر بار ۱۲۰μC روی هر صفحه‌ی خازن ذخیره شود، ظرفیت خازن را محاسبه کنید. اگر این خازن را به اختلاف پتانسیل ۳۶ ولت وصل کنیم، بار الکتریکی ذخیره شده در آن چه اندازه می‌شود؟

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۲ـ۱۶ داریم :

$$C = \frac{q}{V}$$

با استفاده ازاین رابطه، داریم :

$$C = \frac{۱/۲ \times ۱۰^{-۴}}{۲۴}$$

$$C = ۵ \times ۱۰^{-۶} F = ۵ \mu F$$

رابطه‌ی (۲ ـ۱۶) را می‌توان به صورت $q = C.V$ نوشت. با استفاده از این رابطه،داریم :

$$q = ۵ \times ۳۶ = ۱۸۰ \mu C$$

۲ـ۱۲ـ عامل‌های مؤثر بر ظرفیت خازن تخت

ظرفیت خازن به بار الکتریکی خازن و اختلاف پتانسیل دو سر آن بستگی ندارد. ظرفیت خازن تخت از مشخصات ساختمانی خازن است و به عامل‌های زیر بستگی دارد.

۱ـ با مساحت سطح مشترک صفحه‌های خازن که روبروی یک‌دیگر قرار دارند، نسبت مستقیم دارد.

$$C \propto A$$

۲ـ با فاصله‌ی دو صفحه از یک‌دیگر نسبت وارون دارد.

$$C \propto \frac{۱}{d}$$

اگر بین دو صفحه‌ی خازن خلأ باشد، ظرفیت خازن تخت از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$C = \varepsilon_{\circ} \frac{A}{d} \qquad (۲ـ۱۷)$$

در رابطه‌ی ۲ـ۱۷، $\varepsilon_{\circ}$ ضریب گذردهی الکتریکی خلأ است. در این رابطه، A بر حسب مترمربع، d برحسب متر و C بر حسب فاراد (F) است.

اگر یک دی‌الکتریک (نارسانا) مانند شیشه یا پارافین فضای بین دو صفحه‌ی خازن تختی را

پُر کند، ظرفیت خازن افزایش می‌یابد. در این صورت، ظرفیت خازن از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$C = k\varepsilon_{\circ} \frac{A}{d} \qquad (۲_۱۸)$$

در رابطه‌ی ۲ــ۱۸، k ضریبی بدون یکاست که به آن **ثابت دی‌الکتریک** گفته می‌شود. ثابت دی‌الکتریک به جنس دی‌الکتریک بستگی دارد. اگر بین دو صفحه خلأ باشد، $k = ۱$ است. k برای سایر دی‌الکتریک‌ها بزرگ‌تر از یک است ($k > ۱$). ثابت دی‌الکتریک برخی از ماده‌ها در جدول ۲ــ۱ آورده شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود ثابت دی‌الکتریک هوا تقریباً برابر ۱ است.

جدول ۲ــ۱ــ ثابت دی‌الکتریک دی‌الکتریک‌های متداول

دی‌الکتریک	ثابت دی‌الکتریک
دی‌الکتریک‌های جامد	
شیشه	۱۰ ــ ۶
میکا	۶/۶ ــ ۵/۶
کاغذ پارافینی	۲/۳ ــ ۲/۱
پارافین (در $۲۰^{\circ}C$)	۲/۵ ــ ۲/۱
دی‌الکتریک‌های مایع	
الکل	۲۵
روغن	۲/۲ ــ ۲
آب	۸۳ ــ ۸۰
دی الکتریک‌های گازی	
دی اکسید کربن	۱/۰۰۰۹۷
هوا	۱/۰۰۰۶۰
هیدروژن	۱/۰۰۰۲۶

مثال ۲ـ۱۶

هر یک از صفحه‌های خازن تختی،به شکل مستطیلی به طول ۶۰cm و عرض ۲۰cm است که بین آن‌ها از دی‌الکتریکی به ضخامت ۱/۵mm و ثابت دی الکتریک ۱۰ پُر شده است. ظرفیت این خازن را محاسبه کنید. $\varepsilon_0 \simeq 9\times10^{-12}\frac{C^2}{N.m^2}$

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۲ــ۱۸ داریم :

$$C = k\varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

$$C = 10\times9\times10^{-12}\times\frac{20\times60\times10^{-4}}{1/5\times10^{-3}}$$

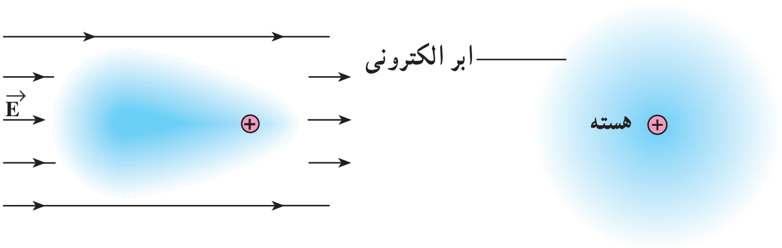
$$C = 7/2\times10^{-9}F = 7/2\,nF$$

فروشکست

دیدیم که اگر اختلاف پتانسیل دو سر خازن را افزایش دهیم، بار ذخیره‌شده در خازن نیز افزایش می‌یابد. آزمایش نشان می‌دهد که اگر بار الکتریکی خازن از مقدار معینی بیش‌تر شود، یک میدان الکتریکی بسیار قوی بین دو صفحه ایجاد می‌شود. این میدان الکتریکی باعث می‌شود که دی‌الکتریک بین دو صفحه به‌طور موقت رسانا شود. در نتیجه، با ایجاد جرقه بین دو صفحه، خازن تخلیه می‌شود. این پدیده را **فروشکست دی‌الکتریک** می‌نامند. پدیده‌ی فروشکست باعث تغییر ماهیت یا سوراخ‌شدن دی‌الکتریک جامد و سوختن خازن می‌شود.

بررسی میکروسکوپیک نقش دی‌الکتریک: در بخش ۲ــ۱۲ دیدیم که قراردادن دی‌الکتریک بین صفحه‌های یک خازن تخت، باعث افزایش ظرفیت آن می‌شود. اما دی‌الکتریک چگونه ظرفیت خازن را افزایش می‌دهد؟

وقتی یک دی‌الکتریک در میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، تأثیر میدان الکتریکی بر اتم باعث می‌شود که ابر الکترونی در خلاف جهت میدان و هسته در جهت میدان جابه‌جا شوند (چرا؟). در نتیجه، مرکز مؤثر بار مثبت و منفی از هم جدا می‌شوند. در این حالت، می‌گوییم که اتم در میدان الکتریکی قطبیده شده است.



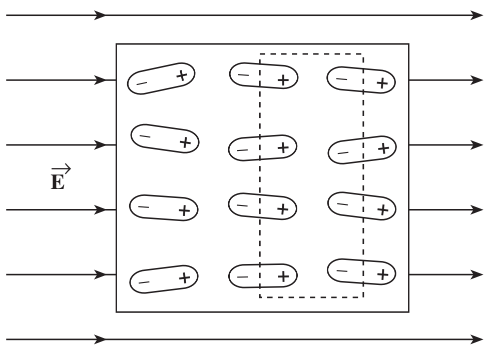
الف ــ در غیاب میدان الکتریکی، مرکز مؤثر بارهای مثبت و منفی بر هم منطبق‌اند.

ب ــ در حضور میدان الکتریکی، مرکز مؤثر بارهای مثبت و منفی از هم جدا شده‌اند.

شکل ۲ــ۴۱

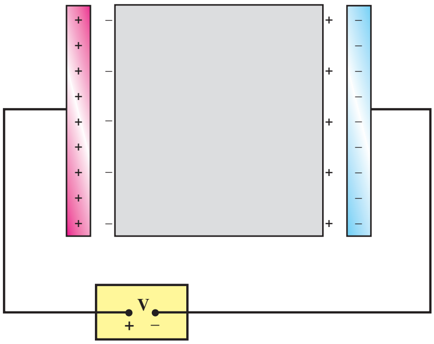
در شکل ۲ــ۴۱ الف ــ یک اتم در غیاب میدان الکتریکی و ب ــ همان اتم در حضور میدان الکتریکی $\vec{E}$ به‌طور طرح‌وار نشان داده شده است. مولکول‌های دی‌الکتریک‌ها در میدان الکتریکی قطبیده می‌شوند.

همان‌طور که در شکل ۲ــ ۴۲ نشان داده شده است، درون دی‌الکتریک، بارهای الکتریکی یک‌دیگر را خنثی می‌کنند.



شکل ۲ــ۴۲ــ دی‌الکتریک در میدان الکتریکی

ولی در مجاورت صفحه‌های خازن، در سطح دی‌الکتریک بارهای غیر هم‌نام با بار صفحه‌ها ایجاد می‌شود (شکل ۲ــ۴۳). نیروی ربایشی بین این بارهای الکتریکی باعث می‌شود که با ولتاژ ثابت، بار خازن نسبت به وقتی که دی‌الکتریک ندارد، افزایش یابد و این به معنای افزایش ظرفیت خازن است.



شکل ۲ــ۴۳

فنّاوری

انواع خازن‌ها: غالباً خازن‌ها را براساس دی‌الکتریک آن‌ها دسته‌بندی می‌کنند ؛ مثلاً خازن کاغذی، الکترولیتی، سرامیکی، میکا و... . خازن‌ها بسیار متنوع‌اند ؛ زیرا برای کاربردهای مختلفی ساخته می‌شوند. در این‌جا با چند نمونه خازن آشنا می‌شوید.



شکل ۲ ــ۴۴

خازن‌های کاغذی: این خـازن‌ها از دو ورقه قلع یـا آلومینیوم تشکیل شده‌اند که بین آن‌ها دو ورقه کاغذ ظریف و نازک آغشته به روغن جا داده می‌شود. این ورق‌ها را

لوله می‌کنند و به‌صورت یک استوانه‌ی فشرده درمی‌آورند و آن را در محفظه‌ی پلاستیکی یا پوشش مومی قرار می‌دهند. ظرفیت این نوع خازن‌ها از ۱nF تا ۱μF است.

خازن‌های میکا: بین ورقه‌های فلزی نازک قلعی، ورقه‌های نازک میکا قرار می‌دهند و ورقه‌های قلع را یک در میان به یک‌دیگر وصل می‌کنند. همه‌ی ورقه‌ها در محفظه‌ی فیبر استخوانی قرار می‌گیرند. ظرفیت این خازن‌ها حدود ۵۰ تا ۵۰۰ پیکوفاراد است.

خازن‌های سرامیکی: دی‌الکتریک این خازن‌ها سرامیک است که با استفاده از انواع سیلیکات‌ها در دمای بالا تهیه می‌شود. ثابت دی‌الکتریک این خازن‌ها بالا و در حدود ۱۰۰۰ است. خازن‌های سرامیکی به شکل عدس تهیه می‌شوند و حجم آن‌ها کم است. صفحه‌های رسانای آن‌ها نیز با ذوب نقره در دو طرف سرامیک تهیه می‌شود. ظرفیت این خازن‌ها حدود ده‌ها نانوفاراد (nF) است.

خازن‌های الکترولیتی: این نوع خازن‌ها از صفحه‌های آلومینیومی تشکیل شده‌اند که در میان آن‌ها الکترولیت‌هایی از انواع مختلف فسفات یا کربنات قرار می‌دهند. در بین صفحه‌ها ماده‌ای اسفنجی است که الکترولیت را به خود جذب می‌کند. ظرفیت این خازن‌ها بالاست و حدود ۱۰۰۰μF می‌رسد.

خازن‌های متغیّر: دی‌الکتریک این خازن‌ها معمولاً هوا است. در ساختمان آن‌ها دو نوع صفحه‌ی فلزی، یک دسته ثابت و دسته‌ی دیگر متغیر به‌کار رفته است که هر دو دسته، روی یک محور قرار گرفته‌اند. ولی صفحه‌های متغیر روی این محور می‌چرخند. صفحه‌ها به شکل نیم‌دایره‌اند و با چرخیدن صفحه‌های متغیر، مساحت خازن کم و زیاد می‌شود. این نوع خازن در گیرنده‌های رادیویی به‌کار می‌رود.



شکل ۲ــ۴۵

۲ـ۱۳ـ انرژی خازن

در بخش ۱ـ۸ دیدیم که وقتی دو بار الکتریکی (هم‌نام یا غیرهم‌نام) در مجاورت یک‌دیگر قرار گیرند، مجموعه‌ی بارها دارای انرژی پتانسیل الکتریکی می‌شوند. خازن پر شده نیز به همین علت دارای انرژی پتانسیل الکتریکی است. در واقع، انرژی‌ای که مولد برای پُر کردن خازن مصرف می‌کند، به‌صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در خازن ذخیره می‌شود. این انرژی را خازن در هنگام تخلیه در یک مدار، پس می‌دهد. انرژی ذخیره شده در خازن را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد :

$$U=\frac{۱}{۲}q\,V=\frac{۱}{۲}C\,V^{۲}=\frac{q^{۲}}{۲C} \qquad (۲ـ۱۹)$$

مثال ۲ـ۱۷

خازنی به ظرفیت ۶μF را به ولتاژ ۲۰۰V وصل می‌کنیم. بارالکتریکی و انرژی ذخیره شده در خازن را محاسبه کنید.

حل: با استفاده از رابطه‌های ۲ـ۱۶ و ۲ـ۱۹ داریم :

$$q=CV$$

$$q=۶\times۱۰^{-۶}\times۲۰۰$$

$$q=۱/۲\times۱۰^{-۳}C=۱/۲mC$$

$$U=\frac{۱}{۲}qV$$

$$U=\frac{۱}{۲}\times۱/۲\times۱۰^{-۳}\times۲۰۰=۰/۱۲J$$

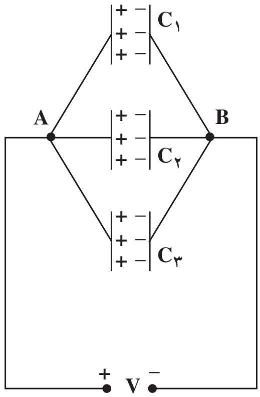
۲ـ۱۴ـ به هم بستن خازن‌ها

در مدارهای الکتریکی، گاهی لازم می‌شود که از ظرفیت معینی استفاده کنیم اما آن را در اختیار نداریم. در این‌گونه موارد می‌توانیم خازن‌ها را به یک‌دیگر ببندیم و ظرفیت موردنظر را به‌دست آوریم. همچنین می‌توان یک خازن را جایگزین چند خازن در یک مدار کرد. به این خازن، **خازن معادل** و به ظرفیت آن، **ظرفیت معادل** می‌گوییم. ظرفیت معادل چند خازن، ظرفیت خازنی است که اگر به‌جای آن خازن‌ها در مدار قرار گیرد و به همان ولتاژی که به دو سر مجموعه‌ی خازن‌ها وصل است، متصل شود، انرژی الکتریکی ذخیره شده در آن برابر انرژی‌ای باشد که در مجموعه‌ی خازن‌ها ذخیره شده است.

در حالت ساده، خازن‌ها ممکن است به‌طور موازی یا متوالی به یک‌دیگر وصل شده باشند. حالت‌های پیچیده‌تر را به کمک این دو حالت ساده می‌توان بررسی کرد.

الف ــ به هم بستن موازی خازن‌ها: اگر خازن‌های $C_۱$ و $C_۲$ و... را مطابق شکل **۲ــ۴۶** به یک‌دیگر وصل کنیم، می‌گوییم خازن‌ها را به‌طور موازی به هم وصل کرده‌ایم. اگر ولتاژ V را به دو سر مجموعه وصل کنیم، اختلاف پتانسیل دو سر هر خازن برابر V می‌شود. بار الکتریکی هر یک از خازن‌ها برابر است با :

$$q_۱ = C_۱V$$
$$q_۲ = C_۲V$$
$$q_۳ = C_۳V$$



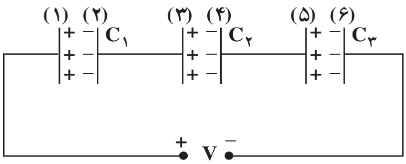
شکل ۲ــ۴۶

بار الکتریکی ذخیره شده در مجموعه‌ی خازن‌ها برابر $q = q_۱ + q_۲ + q_۳$ است. اگر خازن معادل به ظرفیت C_T را به همین ولتاژ وصل کنیم، بار ذخیره شده در آن $q = C_TV$ می‌شود. درنتیجه، داریم :

$$q = C_TV$$
$$q_۱ + q_۲ + q_۳ = C_TV$$
$$(C_۱ + C_۲ + C_۳)V = C_TV$$
$$C_T = C_۱ + C_۲ + C_۳ \qquad (۲ــ۲۰)$$

بنابراین، ظرفیت خازن معادل مجموعه‌ای از خازن‌ها که به‌طور موازی به یک‌دیگر وصل شده‌اند، برابر مجموع ظرفیت خازن‌هاست و ظرفیت خازن معادل از ظرفیت هر یک از خازن‌ها بیش‌تر است.

ب ــ به هم بستن متوالی خازن‌ها: در شکل **۲ــ۴۷** سه خازن به‌طور متوالی به یک‌دیگر وصل شده‌اند. وقتی خازن‌ها به‌طور متوالی به یک ولتاژ وصل می‌شوند، هیچ کدام از آن‌ها به‌طور مستقل به ولتاژ V وصل نیستند. اگر روی صفحه‌ی ۱ بار +q



شکل ۲ــ۴۷

انباشته شود، بار $-q$ روی صفحه‌ی ۲ القا می‌گردد. مجموع بار صفحه‌های ۲ و ۳ برابر صفر است (چرا؟) ؛ بنابراین، بار $+q$ روی صفحه‌ی ۳ انباشته می‌شود و به همین ترتیب، بار هر خازن برابر q می‌شود. بار ذخیره شده روی مجموعه‌ی خازن‌ها نیز برابر q است. اگر ولتاژ خازن‌ها به‌ترتیب V_1 و V_2 و V_3 باشد، ولتاژ دو سر مدار برابر مجموع ولتاژ دو سر خازن‌هاست.

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

اگر به‌جای V_1 و V_2 و V_3 مساوی آن‌ها را از رابطه‌های $V_1 = \frac{q}{C_1}$ و $V_2 = \frac{q}{C_2}$ و $V_3 = \frac{q}{C_3}$ قرار دهیم، نتیجه می‌شود :

$$V = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

اگر C_T ظرفیت خازن معادل باشد، وقتی به ولتاژ V وصل شود، بار آن برابر q می‌شود و درنتیجه، $V = \frac{q}{C_T}$ است. با قرار دادن $\frac{q}{C_T}$ به‌جای V نتیجه می‌شود :

$$\frac{q}{C_T} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

و یا :

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \qquad (۲_۲۱)$$

بنابراین، وقتی خازن‌ها به‌طور متوالی به یک‌دیگر وصل می‌شوند، بار هر یک از خازن‌ها برابر با بار خازن معادل آن‌ها و وارون ظرفیت معادل، برابر مجموع وارون ظرفیت خازن‌هاست و ظرفیت معادل از کوچک‌ترین ظرفیت نیز کوچک‌تر است.

مثال ۲ــ۱۸

به دو سر مجموعه‌ی سه خازن به ظرفیت‌های $6\mu F$، $3\mu F$ و $2\mu F$ که به‌طور متوالی به یک‌دیگر وصل‌اند، اختلاف پتانسیل $150V$ را وصل می‌کنیم. الف ــ ظرفیت خازن معادل، ب ــ بار الکتریکی هر خازن و پ ــ ولتاژ دو سر هر خازن را حساب کنید.

حل: الف ــ با استفاده از رابطه‌ی ۲ــ۲۱ داریم :

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2}$$

$$\frac{۱}{C_T} = \frac{۱+۲+۳}{۶}$$

$$C_T = ۱\mu F$$

ب ــ بار الکتریکی هر خازن، برابر با بار خازن معادل آن‌هاست.

$$q = CV$$

$$q = ۱ \times ۱۵۰ = ۱۵۰\mu C$$

$$q_۱ = q_۲ = q_۳ = q = ۱۵۰\mu C$$

پ ــ با استفاده از رابطه‌ی $q = CV$ داریم :

$$V = \frac{q}{C}$$

$$V_۱ = \frac{۱۵۰}{۶} = ۲۵V$$

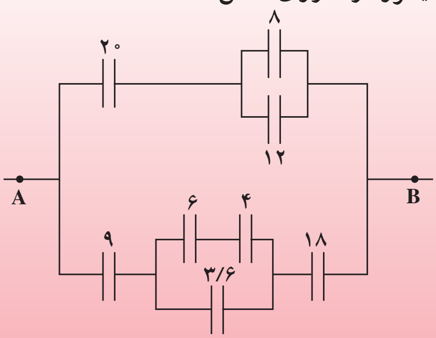
$$V_۲ = \frac{۱۵۰}{۳} = ۵۰V$$

$$V_۳ = \frac{۱۵۰}{۲} = ۷۵V$$

ممکن است در یک مدار، خازن‌ها به‌صورت پیچیده‌تری به یک‌دیگر وصل شده باشند. با استفاده از محاسبه‌ی ظرفیت خازن‌های موازی و متوالی، می‌توان مدار را ساده کرد و در نهایت، ظرفیت معادل را به‌دست آورد.

مثال ۲ــ۱۹

ظرفیت معادل بین دو نقطه‌ی A و B را در شکل ۲ــ ۴۸ محاسبه کنید. ظرفیت هر خازن برحسب میکروفاراد روی شکل داده شده است.

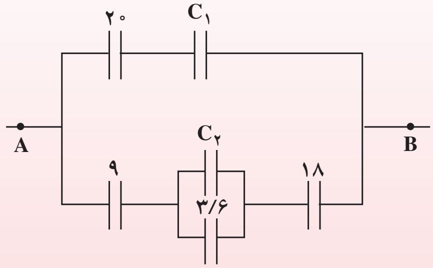


شکل ۲ــ ۴۸

حل: دو خازن ۸μF و ۱۲μF با یک‌دیگر موازی و خازن ۴μF با ۶μF به‌طور متوالی به یک‌دیگر وصل شده‌اند. اگر به‌جای آن‌ها خازن معادل آن‌ها را قرار دهیم، مدار به‌صورت شکل ۲ــ۴۹ساده می‌شود.

$$C_۱ = ۱۲ + ۸ = ۲۰\mu F$$

$$C_۲ = \frac{۶ \times ۴}{۶ + ۴} = ۲/۴\mu F$$

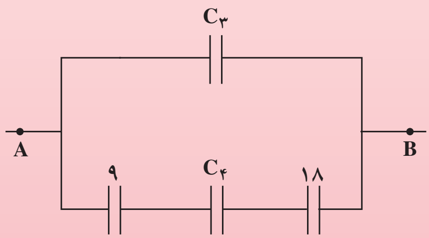


شکل ۲ــ۴۹

اکنون خازن‌های ۲۰ میکروفارادی با یک‌دیگر متوالی‌اند و خازن $C_۲$ با خازن ۳/۶ میکروفارادی موازی است. مدار به‌صورت شکل ۲ــ۵۰ ساده می‌شود.

$$C_۳ = \frac{۲۰}{۲} = ۱۰\mu F$$

$$C_۴ = ۲/۴ + ۳/۶ = ۶\mu F$$



شکل ۲ــ۵۰

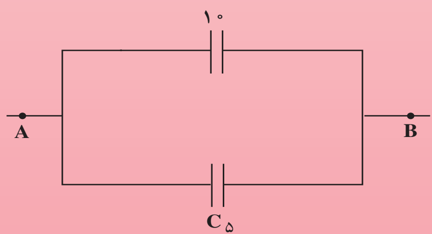
اگر خازن معادل سه خازن ۱۸μF، $C_۴$ و ۹μF را که متوالی‌اند را با $C_۵$ نشان دهیم، مدار به‌صورت شکل ۲ــ۵۱ ساده می‌شود.

$$\frac{۱}{C_۵} = \frac{۱}{۹} + \frac{۱}{۶} + \frac{۱}{۱۸}$$

$$\frac{۱}{C_۵} = \frac{۲ + ۳ + ۱}{۱۸}$$

$$C_۵ = \frac{۱۸}{۶} = ۳\mu F$$

$$C_T = ۱۰ + ۳ = ۱۳\mu F$$



شکل ۲ــ۵۱

مثال ۲ــ ۲۰

دو خازن به ظرفیت $C_۱ = ۲\mu F$ و $C_۲$ را به‌یک‌دیگر وصل می‌کنیم و ولتاژ $۱۰۰V$ را به دو سر مجموعه‌ی آن‌ها می‌بندیم. اگر انرژی ذخیره شده در مجموعه‌ی خازن‌ها برابر ۲۵ میلی‌ژول شود، تعیین کنید که خازن‌ها چگونه به یک‌دیگر وصل شده‌اند. ظرفیت $C_۲$ را نیز محاسبه کنید.

حل: اگر ظرفیت معادل دو خازن برابر C_T باشد، داریم :

$$U = \frac{۱}{۲}C_T V^۲$$

$$۲۵\times ۱۰^{-۳} = \frac{۱}{۲}C_T \times ۱۰^۴$$

$$C_T = ۵\times ۱۰^{-۶}F = ۵\mu F$$

چون ظرفیت معادل از $C_۱$ بزرگ‌تر است، دو خازن به‌طور موازی به یک‌دیگر وصل شده‌اند.

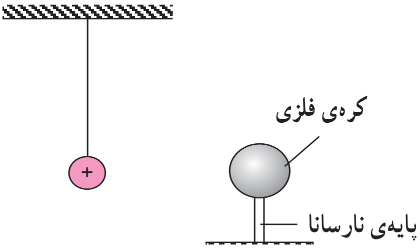
$$C_T = C_۱ + C_۲$$

$$۵ = ۲ + C_۲$$

$$C_۲ = ۳\mu F$$

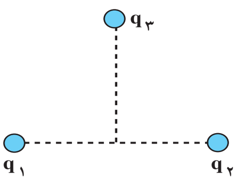
تمرین‌های فصل دوم

۱ــ یک کره‌ی فلزی بدون بار الکتریکی را که روی پایه‌ی نارسانایی قرار دارد، به آونگ الکتریکی بارداری نزدیک می‌کنیم. با ذکر دلیل توضیح دهید که چه اتفاقی می‌افتد.



شکل ۲ــ۵۲

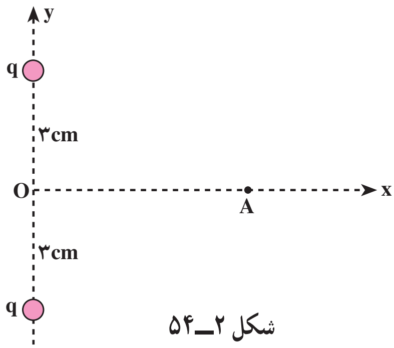
۲ــ بارهای الکتریکی نقطه‌ای $q_۱ = -۴\mu C$ و $q_۲ = -۳\mu C$ مطابق شکل در فاصله‌ی $۸cm$ از یک‌دیگر ثابت شده‌اند. بار نقطه‌ای $q_۳ = -۵\mu C$ را در نقطه‌ای که فاصله‌ی آن از هر یک از دو بار الکتریکی قبلی برابر $۵cm$ است، قرار می‌دهیم. نیروی الکتریکی وارد بر بار $q_۳$ را محاسبه کنید.



شکل ۲ــ۵۳

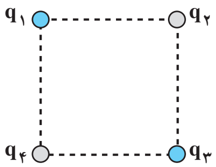
۳ــ توضیح دهید که چرا خط‌های میدان الکتریکی یکنواخت، به‌صورت خط‌های راست و موازی با فاصله‌های مساوی با یک‌دیگرند.

۴ــ دو بار الکتریکی نقطه‌ای هم‌نام $q=+5\mu C$ مطابق شکل ۲ــ۵۴ به فاصله‌ی ۶cm از یک‌دیگر قرار دارند. جهت و اندازه‌ی میدان الکتریکی را در نقطه‌ی A واقع بر عمودمنصف خط واصل دو بار، در فاصله‌ی ۴cm از نقطه‌ی O (وسط خط واصل دو بار) مشخص کنید.



شکل ۲ــ۵۴

۵ــ سه ذره‌ی باردار q_1 ، q_2 و q_3 مطابق شکل ۲ــ۵۵ در سه رأس مربعی ثابت شده‌اند. اگر $q_1=q_3=-5\mu C$ باشد، نوع و اندازه‌ی بار q_2 را طوری تعیین کنید که بار q_4 در حال تعادل باشد.



شکل ۲ــ۵۵

۶ــ در یک میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی $5\times10^{4}\,\frac{N}{C}$ که جهت آن قائم و رو به پایین است، ذره‌ی بارداری به جرم ۲g معلق و به حال سکون قرار دارد. اگر $g=10\frac{N}{kg}$ باشد، اندازه و نوع بار الکتریکی ذره را مشخص کنید.

۷ــ غلظت الکترون‌ها در ارتفاعات مختلف جو زمین متفاوت است. وقتی ماهواره‌ای به دور زمین می‌چرخد بر اثر عبور از فضای اطراف زمین باردار می‌شود (شکل ۲ــ۵۶). این بارها ممکن است موجب آسیب رساندن به قطعات الکترونیکی ماهواره شود. فرض کنید ماهواره‌ی امید در اثر عبور از یکی از لایه‌های جو دارای بار الکتریکی $q=2/05\times10^{-9}C$ شود. این ماهواره مکعبی به ابعاد $40cm\times40cm\times40cm$ است. چگالی سطحی بار الکتریکی روی سطح این ماهواره را محاسبه کنید. (از تجمع بار بر روی لبه‌ها چشم‌پوشی شود.)


شکل ۲ــ۵۶

۸ــ بار $q = +5\mu C$ را با سرعت ثابت در میدان الکتریکی یکنواخت $8\times10^{5}\,\frac{N}{C}$ مطابق شکل ۲ــ۵۷ از نقطه‌ی A تا B جابه‌جا می‌کنیم. اگر $AB = 2m$ و $\alpha = 30$ درجه باشد:

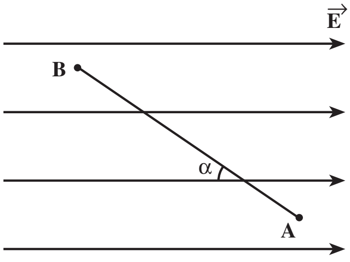
الف ــ نیروی الکتریکی وارد بر بار q،

ب ــ کاری که برای این جابه‌جایی باید انجام دهیم،

پ ــ تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار q

را حساب کنید.

$\cos 30^\circ = 0/86$



شکل ۲ــ۵۷

۹ ــ دو صفحه‌ی رسانا با فاصله‌ی ۲cm را موازی یک‌دیگر قرار می‌دهیم و آن‌ها را به اختلاف پتانسیل ۱۰۰V وصل می‌کنیم. درنتیجه، یکی از صفحه‌ها به‌طور منفی و دیگری به‌طور مثبت باردار می‌شوند و میان دو صفحه میدان الکتریکی یکنواختی بوجود می‌آید. اندازه‌ی این میدان الکتریکی را حساب کنید و توضیح دهید که کدام‌یک از دو صفحه پتانسیل الکتریکی بیش‌تری دارند.

۱۰ــ در یک میدان الکتریکی، بار $q = +2\mu C$ از نقطه‌ی A تا B جابه‌جا می‌شود. اگر انرژی پتانسیل آن در نقطه‌های A و B به‌ترتیب $-4\times10^{-5}\,J$ و $5\times10^{-5}\,J$ باشد، اختلاف پتانسیل الکتریکی میان دو نقطه $(V_B - V_A)$ را محاسبه کنید.

۱۱ــ بار الکتریکی $q = -4\mu C$ از نقطه‌ای با پتانسیل الکتریکی $V_1 = -40V$ تا نقطه‌ای با پتانسیل $V_2 = -10V$ آزادانه جابه‌جا می‌شود. الف ــ انرژی پتانسیل الکتریکی بار q چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟ ب ــ توضیح دهید که تغییر انرژی پتانسیل بار q (با توجه به قانون پایستگی انرژی) به چه انرژی‌ای تبدیل می‌شود؟

۱۲ــ دو صفحه‌ی رسانا به فاصله‌ی یک سانتی‌متر از هم و موازی یک‌دیگر واقع‌اند. اختلاف پتانسیل میان دو صفحه برابر ۱۰۰۰V است. یک ذره به بار $+1/6\times10^{-19}C$ و جرم $1/6\times10^{-27}kg$ (یک پروتون) از مجاور صفحه‌ی مثبت و از حال سکون به طرف صفحه‌ی منفی شتاب می‌گیرد. انرژی پتانسیل الکتریکی این ذره وقتی به صفحه‌ی روبرو می‌رسد، افزایش می‌یابد یا کاهش؟ اندازه‌ی تغییرات این انرژی را حساب کنید. سرعت ذره در لحظه‌ی رسیدن به این صفحه چه‌قدر است؟

۱۳ــ اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی یک خازن را از ۲۸ ولت به ۴۰ ولت افزایش می‌دهیم. اگر با این کار ۱۵ میکروکولن بر بار ذخیره شده در خازن افزوده شود، ظرفیت خازن را حساب کنید.

۱۴ــ دو صفحه‌ی مربعی شکل به ضلع ۱۶cm در فاصله‌ی ۲mmاز یک‌دیگر قرار دارند. فضای بین دو صفحه از پارافین با ضریب دی‌الکتریکی ۲/۵ پر شده است. ظرفیت خازن حاصل چه اندازه است؟

۱۵ــ خازنی به ظرفیت $C_1 = ۵\mu F$ با اختلاف پتانسیل ۱۲۰۰V و خازنی به ظرفیت $C_2 = ۱۰\mu F$ با اختلاف پتانسیل ۷۵۰ ولت پر شده‌اند. اگر این خازن‌های پر را از مدار اصلی آن‌ها جدا و صفحه‌های هم‌نام آن‌ها را به هم وصل کنیم، الف ــ اختلاف پتانسیل بین دو صفحه و بار ذخیره شده در هر خازن چه اندازه می‌شود؟

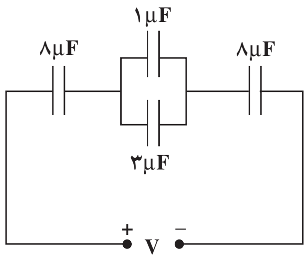
ب ــ مجموع انرژی ذخیره شده در دو خازن را قبل و بعد از اتصال به یک‌دیگر محاسبه و با هم مقایسه کنید.

۱۶ــ ظرفیت خازنی ۱۲ میکروفاراد و بارالکتریکی آن q است. 8J انرژی باید مصرف کنیم تا ۳mC+ بار الکتریکی را از صفحه‌ی منفی جداکرده و به صفحه‌ی مثبت منتقل کنیم. q را محاسبه کنید.

۱۷ــ در مدار شکل ۲ــ۵۸ اختلاف پتانسیل در سر مدار برابر ۱۰V است.

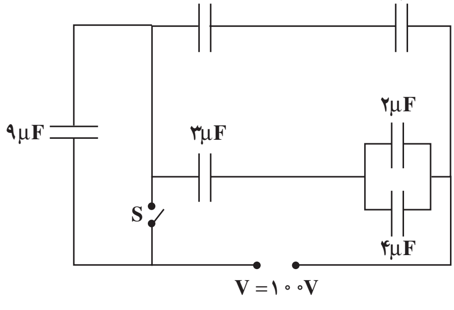
الف ــ ظرفیت معادل مدار

ب ــ بار الکتریکی و اختلاف پتانسیل دو سر هر یک از خازن‌ها را حساب کنید.



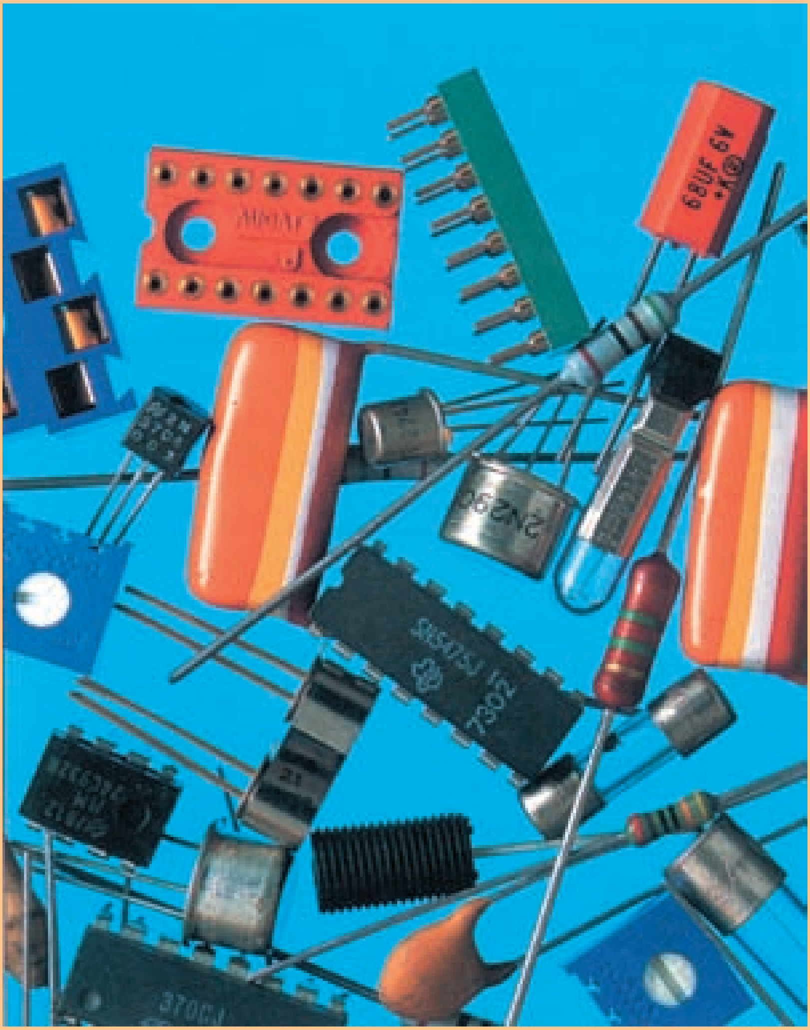
شکل ۲ــ۵۸

۱۸ــ در شکل ۲ــ۵۹، انرژی ذخیره شده در مجموعه‌ی خازن‌ها را در حالتی که الف ــ کلید S باز و ب ــ کلید S بسته است، حساب کنید.



شکل ۲ــ۵۹

۳



شکل بالا تعدادی از قطعات مورد استفاده در مدارهای الکتریکی و الکترونیکی را نشان می‌دهد.

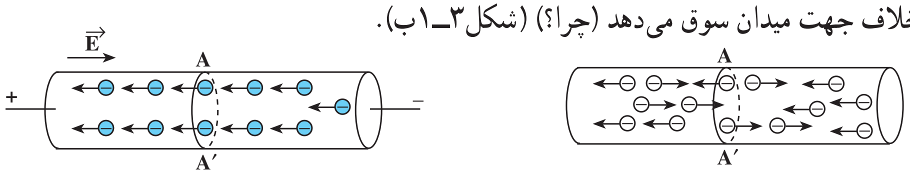
فصل ۳

جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

در فصل دوم،مفهوم‌های بار الکتریکی، میدان الکتریکی و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از میدان الکتریکی را معرفی کردیم و به بررسی پاره‌ای از ویژگی‌های بار الکتریکی ساکن پرداختیم. در این فصل آثار ناشی از حرکت بارهای الکتریکی ــ یعنی پدیده‌ی شارش بار ــ در مواد رسانا را بررسی خواهیم کرد و خواهیم دید که شارش بار در رسانا سبب انتقال انرژی در آن می‌شود. این انرژی به انرژی‌های دیگر نظیر انرژی درونی، انرژی مکانیکی و انواع دیگر انرژی تبدیل می‌شود.

۳ــ۱ــ جریان الکتریکی

در فیزیک ۱ دیدیم که رسانایی فلزها به‌دلیل وجود الکترون‌های آزاد است که در داخل آن‌ها با سرعت‌های متفاوت به‌طور کاتوره‌ای درحرکت‌اند. تا زمانی که اختلاف پتانسیل الکتریکی به دو سر رسانا اعمال نشده باشد، الکترون‌های آزادی که در بازه‌ی زمانی Δt از مقطع AA' (شکل ۳ــ۱ الف) از راست به چپ در حرکت‌اند، با الکترون‌های آزادی که در همان بازه‌ی زمانی از همان مقطع از چپ به راست حرکت می‌کنند، برابرند ؛ یعنی، به‌طور متوسط بارخالصی که از مقطع AA' یا هر مقطع عرضی دیگر رسانا می‌گذرد، در یک بازه‌ی زمانی صفر است. هنگامی که دو سر رسانا را به باتری وصل و به این وسیله به دو سر آن اختلاف پتانسیل اعمال می‌کنیم، یک میدان الکتریکی در داخل رسانا ایجاد می‌شود. این میدان به الکترون‌های آزاد درون رسانا نیرو وارد می‌کند و آن‌ها را به خلاف جهت میدان سوق می‌دهد (چرا؟) (شکل ۳ــ۱ ب).



وقتی در دو سر رسانا اختلاف پتانسیل وجود ندارد، شارش بار خالص از مقطع AA' صفر است.

الف

وقتی در دو سر رسانا اختلاف پتانسیلی اعمال می‌شود، شارش بار خالص از مقطع AA' صفر نیست.

ب

شکل ۳ــ۱

در این حالت، بار خالصی که از هر مقطع عبور می‌کند صفر نیست و می‌گوییم در رسانا شارش بار وجود دارد. به عبارت دیگر، در آن جریان الکتریکی برقرار شده است.

درکتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که جریان الکتریکی در خلاف جهت شارش الکترون‌ها است یعنی جریان الکتریکی در جهت میدان الکتریکی است و چون پتانسیل در جهت میدان کاهش می‌یابد، جهت جریان الکتریکی از پتانسیل بیش‌تر به پتانسیل کم‌تر است.

بار شارش شده در واحد زمان را **شدت جریان متوسط** گویند. اگر در بازه‌ی Δt بار Δq در رسانا شارش کرده باشد، شدت جریان متوسط از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\overline{I} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \qquad (۳_۱)$$

همان‌طور که می‌دانید، یکای شدت جریان، **آمپر** نام دارد.

اگر در تمام بازه‌های زمانی شدت جریان متوسط ثابت بماند، جریان را **مستقیم** می‌نامند. در این‌صورت، شدت جریان لحظه‌ای با شدت جریان متوسط برابر می‌شود. در این حالت ، رابطه‌ی(۳ــ۱) به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$I = \frac{q}{t} \qquad (۳_۲)$$

در این رابطه،q بار شارش شده در مدت t برحسب کولن و t برحسب ثانیه و I، شدت جریان برحسب آمپر است.

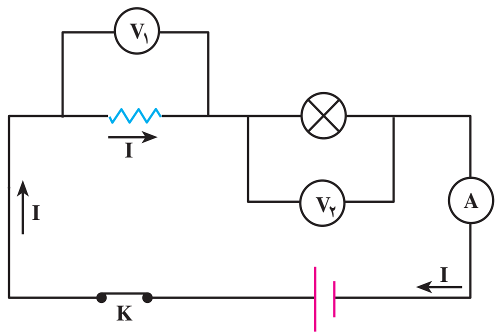
در رابطه‌ی $q=It$ اگر I برحسب آمپر و t برحسب ساعت باشد، مقدار بار برحسب آمپر ساعت به‌دست می‌آید.

فعالیت ۳ــ۱

بار ذخیره شده در باتری‌های اتومبیل را معمولاً با آمپر ساعت مشخص می‌کنند. منظور از این اصطلاح بیشینه‌ی بار الکتریکی است که در باتری ذخیره می‌شود. اگر بار الکتریکی باتری یک اتومبیل ۶۰ آمپر ساعت باشد و در مدت ۱۰ ساعت از آن جریان بگیریم، شدت جریان متوسط را برآورد کنید.

برای آن‌که جریان الکتریکی برقرار شود، باید بار در یک مسیر بسته شارش کند. این مسیر بسته را **مدار الکتریکی** می‌نامیم. مدارهای الکتریکی‌ای که در این فصل بررسی می‌کنیم، شامل رساناهای فلزی (سیم یا لامپ رشته‌ای)، منبع تأمین انرژی الکتریکی (باتری یا پیل یا منبع تغذیه)، کلید قطع و

وصل، وسیله‌های اندازه‌گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل (آمپرسنج و ولت‌سنج) است. این قطعه‌ها را **اجزای مدار الکتریکی** می‌نامند و برای رسم هر یک نمادی را به‌طور قراردادی به‌کار می‌برند. شما در کتاب فیزیک ۱ با این نمادها آشنا شده‌اید. شکل ۳ــ۲ یک مدار الکتریکی و طرز قرار گرفتن آمپرسنج و ولت‌سنج را در این مدار نشان می‌دهد.



شکل ۳ــ۲

۳ــ۲ــ قانون اهم

همان‌طورکه در فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدید، بنا به قانون اهم نسبت اختلاف پتانسیل دو سر رسانای فلزی به شدت جریانی که از آن می‌گذرد، در دمای ثابت، مقدار ثابتی است. این نسبت را **مقاومت الکتریکی رسانا** می‌نامند و یکای آن اُهم با نمادِ Ω است.

$$\frac{V}{I} = R \qquad (۳ـ۳)$$

مقاومت را با وسیله‌ای به نام اهم سنج اندازه می‌گیرند. این وسیله همراه با ولت سنج وآمپرسنج یک دستگاه را تشکیل می‌دهند که آوومتر(AVOmetre، A برای آمپر، Vبرای ولت وO برای اهم) نامیده می‌شود.

۳ــ۳ــ عوامل مؤثر در مقاومت رساناهای فلزی

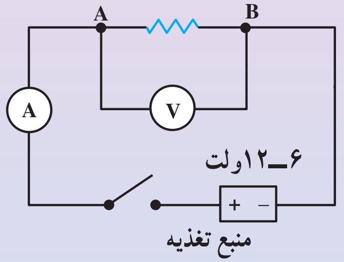
مقاومت یک رسانای فلزی در دمای ثابت به طول، سطح مقطع و جنس آن بستگی دارد. برای بررسی رابطه‌ی مقاومت رسانا با عوامل یاد شده آزمایش ۳ــ۱ را انجام دهید.

آزمایش ۳ـ۱

وسیله‌های آزمایش: منبع تغذیه، سیم رابط، سیم‌هایی از جنس تنگستن، نیکروم (یا آلیاژهای مختلف دیگر)، آمپرسنج، ولت‌سنج، کلید.

۱ــ در مداری مطابق شکل ۳ــ۳ بین دو نقطه‌ی A و B قطعه‌ای با طول معین (مثلاً ۱/۵ متر) از سیم تنگستن یا نیکروم را قرار دهید. پس از بستن کلید، اختلاف پتانسیل دو سر سیم و شدت جریانی را که از مدار می‌گذرد، اندازه بگیرید و با استفاده از قانون اهم ($R = \frac{V}{I}$)، مقاومت قطعه سیم را به‌دست آورید.

در آزمایشی دیگر، از همان سیم تنگستن قطعه‌ای به طول $\frac{۱}{۲}$ یا $\frac{۱}{۳}$ طول قبلی را بین دو نقطه‌ی A و B قرار دهید و با اندازه‌گیری V و I مقاومت قطعه‌ی اخیر را به‌دست آورید. نتیجه را در جدول ثبت کنید.



شکل ۳ــ۳

۲ــ آزمایش را با دو قطعه سیم هم‌طول و با سطح مقطع یکسان یکی از جنس تنگستن و دیگری از جنس نیکروم تکرار کنید و نتیجه را در جدول بنویسید.

ــ این بار با انجام دادن دو آزمایش با سیم‌های هم‌طول از یک جنس ولی با سطح مقطع‌های متفاوت، به همان ترتیب، مقاومت هر یک از سیم‌ها را به‌دست آورید و ارقام را در جدول ثبت کنید.

شماره‌ی آزمایش	جنس سیم	طول سیم l	سطح مقطع سیم A	I	V	$R = \frac{V}{I}$

نتیجه‌های به‌دست آمده را با یک‌دیگر مقایسه کنید و به کلاس گزارش دهید.

آزمایش ۳ـ۱ نشان می‌دهد که اگر سطح مقطع سیم در تمام طول آن یکسان باشد، رابطه‌ی مقاومت سیم با سایر ویژگی‌های آن به‌صورت زیر است.

$$R = \rho \frac{l}{A} \qquad (۳_۴)$$

در این رابطه، ρ مربوط به جنس سیم است و **مقاومت ویژه‌ی رسانا** نام دارد. مقاومت ویژه‌ی هر فلز، مقاومت قطعه‌ای از آن فلز است به طول یک متر و به سطح مقطع یک مترمربع. l طول سیم برحسب متر و A سطح مقطع سیم برحسب مترمربع است.

تمرین ۳ـ۱

طول و قطر سیم مسی A دو برابر طول و قطر سیم مسی B است. مقاومت سیم A چند برابر مقاومت سیم B است؟

مقاومت ویژه‌ی پاره‌ای از رساناها ــ مانند نقره و مس ــ کم و پاره‌ای دیگر ــ مانند تنگستن و آهن ــ نسبتاً زیاد است.

فعالیت ۳ـ۲

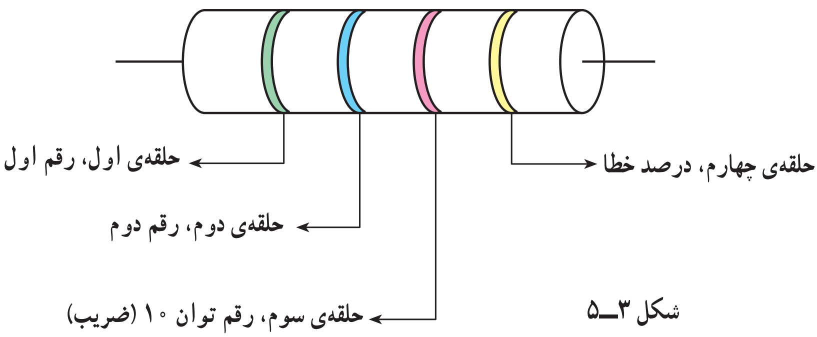
آزمایشی برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه‌ی فلز طراحی کنید و توضیح دهید که چگونه می‌توانید دقت اندازه‌گیری را افزایش دهید.

کُدگذاری مقاومت‌ها: مقاومت‌های الکتریکی را برای مصرف‌های مختلف می‌سازند. کارخانه‌های سازنده برای سهولت در تولید، مقاومت‌های خاصی را به‌عنوان استاندارد انتخاب می‌کنند و می‌سازند و با حلقه‌های رنگی که در روی آن‌ها اندازه مقاومت‌ها را مشخص می‌کنند، به هر رنگ عدد خاصی را نسبت می‌دهند. در انتها نیز با یک حلقه‌ی طلایی یا نقره‌ای درصد خطا را مشخص می‌کنند. در این نوع مقاومت‌ها اغلب از کربن هم استفاده می‌شود؛ به این دلیل آن‌ها را **مقاومت کربنی** نیز می‌گویند.



شکل ۳ــ۴

در روی مقاومت کربنی چهار حلقه‌ی رنگی مشاهده می‌شود (شکل ۳ــ ۵). حلقه‌ی طلایی یا نقره‌ای را سمت راست قرار می‌دهیم و حلقه‌ها را از سمت چپ به ترتیبِ رقم اول و رقم دوم و سوم نام‌گذاری می‌کنیم. هر رنگ معرف عددی است ؛ این اعداد در جدول ۳ــ۱ آورده شده‌اند. حلقه‌ی اول از سمت چپ رقم اول و حلقه‌ی دوم، رقم دوم مقاومت را نشان می‌دهد. رقم سوم ضریب مقاومت به صورت 10^n است که n در ستون چهارم جدول ۳ــ۱ داده شده است. حلقه‌ی چهارم درصد خطا را درتعیین مقاومت مشخص می‌کند. به عنوان مثال فرض کنید حلقه‌ی اول قرمز و حلقه‌ی دوم بنفش و حلقه‌ی سوم سیاه است. قرمز معرف عدد ۲ و بنفش معرف عدد ۷ است. تا این‌جا مشخص می‌شود که دو رقم اولِ مقدار مقاومت مورد نظر ۲۷ است. چون حلقه‌ی سوم سیاه است، $n=0$ و اندازه‌ی مقاومت ۲۷Ω است.



شکل ۳ــ۵

به جدول زیر توجه کنید. (حفظ کردن ارقام این جدول ضرورت ندارد.)

جدول ۳ــ۱

رنگ حلقه	حلقه‌ی اول رقم اول	حلقه‌ی دوم رقم دوم	حلقه‌ی سوم عدد n در ۱۰^n
سیاه	۰	۰	۰
قهوه‌ای	۱	۱	۱
قرمز	۲	۲	۲
نارنجی	۳	۳	۳
زرد	۴	۴	۴
سبز	۵	۵	۵
آبی	۶	۶	۶
بنفش	۷	۷	۷
خاکستری	۸	۸	—
سفید	۹	۹	—

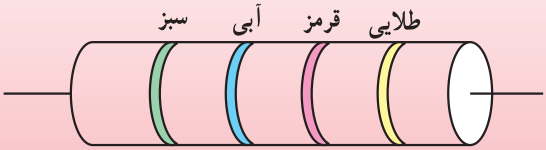
مثال۳ــ۱

اندازه‌ی مقاومت زیر چند اهم است؟

حل: با توجه به جدول۳ــ۱، رنگ سبز عدد ۵ و رنگ آبی عدد ۶ را نشان می‌دهد و چون قرمز معرف ۲ است :

$$R = \overline{ab} \times ۱۰^{n}$$

(n ← رقم سوم ، a ← رقم اول ، b ← رقم دوم)



شکل ۳ــ۶

$$R = ۵۶ \times ۱۰^{۲} = ۵۶۰۰\Omega$$

آزمایش ۳ـ۲

وسیله‌های آزمایش: اهم‌متر، تعدادی مقاومت مختلف

به کمک اعضای گروه خود ابتدا با استفاده از جدول و سپس با به‌کارگیری اهم‌متر مقاومت ده نمونه از مقاومت‌هایی را که در آزمایشگاه در اختیار شماست، به‌دست آورید و نتیجه را در جدول قرار دهید.

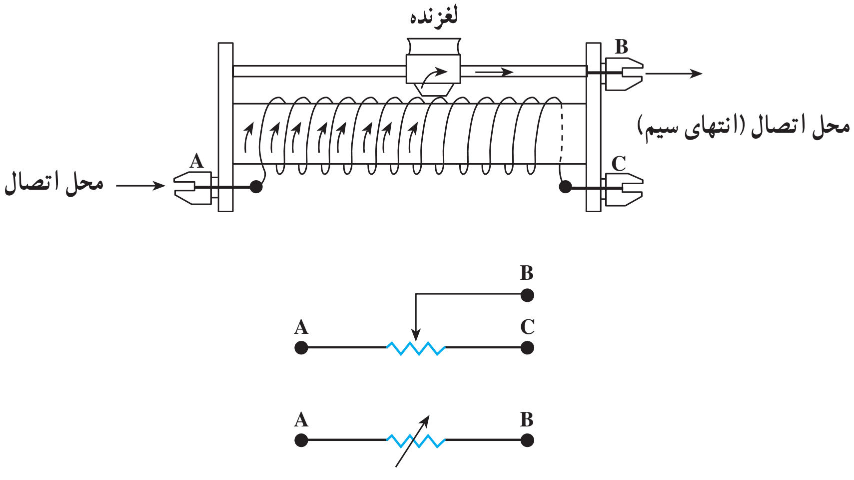
ردیف	R با استفاده از اهم‌سنج	R از روی رنگ‌ها	ΔR

مقاومت‌های کربنی معمولاً با توان کم ــ بین ۱ تا ۲ وات ــ کار می‌کنند. اندازه‌های استاندارد آن‌ها نیز عمدتاً به‌صورت زیر است.

$$R = (۱/۷, ۲/۷, ۳/۹, ۴/۷, ۵/۶, ۶/۸, ۸/۲, ۱۰, ۱۲, ۱۵, ۱۸, ۲۲) \times ۱۰^{n}$$

$$n = ۱, ۲, ۳, ۴, ۵, ۶$$

استفاده از مقاومت متغیر برای کنترل جریان: معمولاً در آزمایشگاه برای تنظیم و کنترل جریان از یک مقاومت متغیر استفاده می‌کنند. این وسیله **رئوستا** نام دارد. در شکل ۳ــ۷ یک رئوستا را مشاهده می‌کنید. همان‌طورکه می‌بینید، این وسیله از یک سیمِ دراز با مقاومت ویژه‌ی نسبتاً زیاد (تنگستن) تشکیل می‌شود. این سیم روی استوانه‌ای نارسانا پیچیده شده است. با استفاده از یک دکمه‌ی لغزنده که روی ریلی در بالای استوانه قرار دارد و انتهای آن با سیم در تماس است، می‌توان قسمت‌های دلخواه از سیم را در مسیر جریان قرار داده و مقاومت را به‌دلخواه تغییر داد. به این ترتیب، می‌توان جریان را در مدار کنترل کرد. رئوستا به‌صورت‌های دیگری از جمله به شکل دایره‌ای ساخته می‌شود. در این صورت، لغزنده به‌صورت عقربه‌ای در مرکز دایره قرار می‌گیرد. برای استفاده



شکل ۳ــ۷

از رئوستا ابتدا آن را با بیش‌ترین مقدار مقاومت در مدار قرار می‌دهند. سپس با لغزنده، مقاومت مناسب را برای جریان مورد نظر تنظیم می‌کنند.

از جعبه‌ی مقاومت نیز می‌توان به‌عنوان مقاومت متغیراستفاده کرد. ساختمان این جعبه به‌گونه‌ای است که با برداشتن فیش مربوط به هریک از مقاومت‌ها، آن مقاومت در مسیر جریان برق قرار می‌گیرد.



شکل ۳ــ۸



شکل ۳ــ۹

۳ــ۴ــ اثر دما بر مقاومت رساناهای فلزی

تجربه نشان می‌دهد که مقاومت ویژه‌ی رساناها به دمای آن‌ها بستگی دارد. در رساناهای فلزی افزایش دما سبب افزایش مقاومت ویژه و درنتیجه، افزایش مقاومت رسانا می‌شود. اگر افزایش دما زیاد نباشد، رابطه‌ی مقاومت ویژه با افزایش دما به‌صورت زیر است.

$$\rho_2 = \rho_1(1+\alpha\,\Delta\theta) \qquad (۳ــ۵)$$

ρ_1 مقاومت ویژه در دمای θ_1 و ρ_2 مقاومت ویژه در دمای $\theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta$ است. α ضریب دمایی مقاومت ویژه برحسب K^{-1} (بر کلوین) است.

با استفاده از رابطه‌های ۳ــ۴ و ۳ــ۵، رابطه‌ی زیر برای مقاومت رسانا به‌دست می‌آید :

$$R_2 = R_1(1+\alpha\,\Delta T) \qquad (۳ــ۶)$$

جدول ۳ــ۲ ضریب دمایی و مقاومت ویژه را در دمای $۲۰^\circ C$ برای چند فلز نشان می‌دهد.

جدول ۳ــ۲

رسانا	مقاومت ویژه Ωm	ضریب دمایی K^{-1}
نقره	$۱/۵۹\times۱۰^{-۸}$	۰/۰۰۶۱
مس	$۱/۶۸\times۱۰^{-۸}$	۰/۰۰۶۸
آلومینیم	$۲/۶۵\times۱۰^{-۸}$	۰/۰۰۴۲۹
تنگستن	$۵/۶\times۱۰^{-۸}$	۰/۰۰۴۵
آهن	$۹/۷\times۱۰^{-۸}$	۰/۰۰۶۵۱
آلیاژ کرم ونیکل	۱۰۰×۱۰^{-۸}	۰/۰۰۰۴

مثال ۳ــ۲

مقاومت سیم مسی به طول ۶/۲۸m و به قطر ۰/۴ میلی‌متر را با استفاده از جدول ۳ــ۲ در دمای $۲۰^\circ C$ محاسبه کنید.

حل: مساحت مقطع سیم از رابطه‌ی $A = \pi r^2$ به‌دست می‌آید ؛ بنابر رابطه‌ی ۳ــ۴ می‌توان نوشت :

$$R = \rho\frac{l}{A} = \rho\frac{l}{\pi r^2}$$

$$R = ۱/۶۸ \times ۱۰^{-۸} \frac{۶/۲۸}{۳/۱۴(۰/۲ \times ۱۰^{-۳})^{۲}} =$$

$R = ۰/۸۴\Omega$ مقاومت سیم

مثال ۳ــ۳

مقاومت سیمی از آلیاژ کُرم و نیکل در دمای $۲۰^{\circ}C$ برابر ۱۰Ω است. مقاومت این قطعه در دمای $۱۰۰^{\circ}C$ چه اندازه است؟

حل: بنا به رابطه‌ی ۳ــ۶ می‌توان نوشت :

$$R_{۲} = R_{۱}(۱ + \alpha \ \Delta T)$$

مقاومت در دمای $۱۰۰^{\circ}C$ برابر است با :

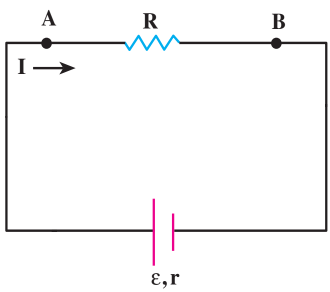
$$R_{۲} = ۱۰(۱ + ۰/۰۰۰۴ \times ۸۰) = ۱۰(۱/۰۳۲) = ۱۰/۳۲\Omega$$

افت پتانسیل در مقاومت: دیدیم که با اعمال اختلاف پتانسیل در دو سر یک رسانا، در درون آن یک میدان الکتریکی برقرار می‌گردد. این میدان باعث شارش بار می شود. جهت میدان الکتریکی در داخل رسانا از پایانه‌ی مثبت باتری به طرف پایانه‌ی منفی آن است.

در فصل قبل، دیدیم که پتانسیل در جهت میدان کاهش می‌یابد ؛ یعنی، وقتی از پایانه‌ی مثبت باتری به‌طرف پایانه‌ی منفی آن می‌رویم، پتانسیل الکتریکی کاهش می‌یابد، در این صورت، می‌گویند که در رسانا افت پتانسیل ایجاد شده است. اگر مقاومت الکتریکی رسانا کوچک باشد، بر طبق قانون اهم این افت پتانسیل ناچیز است ؛ مثلاً در بستن مدار از سیم‌های رابط با مقاومت کم استفاده می‌کنیم تا بتوانیم از افت پتانسیل در آن‌ها صرف‌نظر کنیم ولی هنگامی که یک قطعه با مقاومت قابل توجه در مدار قرار دارد ــ مانند مقاومت R در شکل ۳ــ۱۰ ــ افت پتانسیل قابل ملاحظه است ومقدار آن طبق رابطه‌ی ۳ــ۳ برابر می‌شود با :

$$\Delta V = V_B - V_A = IR \qquad (۳\text{ـ}۷)$$

در این رابطه I جریانی است که از مقاومت R می گذرد.



شکل ۳ــ۱۰

۳ــ۵ــ محاسبه‌ی انرژی الکتریکی مصرف‌شده در یک مقاومت

در فصل قبل، دیدیم هنگامی که بار مثبت q در جهت میدان الکتریکی یکنواخت حرکت می‌کند، انرژی پتانسیل آن به‌اندازه‌ی $q\Delta V$ کاهش می‌یابد. به همین ترتیب، اگر بار q ازمقاومت R در شکل ۳ــ۱۰ عبور کند، انرژی پتانسیل الکتریکی آن به‌اندازه‌ی $\Delta U = q\Delta V$ کاهش می‌یابد. این کاهش انرژی صرف افزایش انرژی جنبشی بارها می‌شود. در اثر برخورد آن‌ها با اتم‌ها، این انرژی به اتم‌های رسانا منتقل می‌شود و انرژی درونی رسانا را افزایش می‌دهد. در نتیجه، رسانا در اثر عبور جریان گرم می‌شود. در یک لامپ، بخشی از انرژی پتانسیل الکتریکی به انرژی نورانی و در موتور الکتریکی به انرژی مکانیکی و انرژی درونی تبدیل می‌شود.

اکنون اگر جریان ثابت I در مدت t ثانیه در سیمی به مقاومت R برقرار باشد، بنابرآن‌چه گفته شد، انرژی پتانسیل الکتریکی U که به انرژی درونی رسانا تبدیل می‌شود از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$U = qV \qquad (۳ــ۸)$$

در این رابطه، V اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت R و U انرژیی است که بار هنگام عبور از سیم از دست می‌دهد. با جای‌گذاری به جای q و V، داریم :

$$U = (It)(RI) = RI^{۲}t \qquad (۳ــ۹)$$

مثال ۳ ـ ۴

مقاومت سیم گرم‌کن یک اتوی برقی ۵۰Ω و جریانی که از آن می‌گذرد ۴ آمپر است. در مدت ۱۵دقیقه، چند ژول و چند کیلووات ساعت انرژی الکتریکی در آن مصرف می‌شود؟

حل: بنابر رابطه‌ی ۳ــ۹ می‌توان نوشت :

$$U = RI^{۲}t \Rightarrow U = ۵۰ \times ۱۶ \times ۹۰۰$$

$$U = ۷۲ \times ۱۰^{۴} \text{ ژول}$$

$$U = \frac{۷۲ \times ۱۰^{۴}}{۳۶ \times ۱۰^{۵}} = ۰/۲ \text{ کیلووات ساعت}$$

فعالیت ۳ـ۳

آزمایشی طراحی کنید که با آن بتوان درستی رابطه‌ی $U = RI^2t$ را تحقیق کرد.

تمرین ۳ـ۲

در دو سر یک سیم نیکروم (آلیاژ کرم و نیکل) به طول ۵ متر و سطح مقطع ۰/۴ میلی‌مترمربع، اختلاف پتانسیل ۲۰۰ ولت را برقرار کرده‌ایم. در هر نیم‌ساعت چند کیلوژول انرژی الکتریکی در این سیم به انرژی درونی تبدیل می‌شود؟ مقاومت ویژه‌ی نیکروم $1\times10^{-6}\,\Omega m$ است.

توان الکتریکی مصرف‌شده در یک مقاومت: در فیزیک ۲ و آزمایشگاه خواندید که توان از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید و یکای آن ژول بر ثانیه است که **وات** نامیده می‌شود.

$$P = \frac{U}{t} \qquad (۳ـ۱۰)$$

بنابر رابطه‌ی ۳ ـ ۸ داریم :

$$P = \frac{qV}{t} = VI \qquad (۳ـ۱۱)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۳ـ۳، رابطه‌ی ۳ـ۱۱ را می‌توان به صورت زیرنوشت :

$$P = \frac{V^2}{R} \qquad (۳ـ۱۲)$$

$$P = RI^2 \qquad (۳ـ۱۳)$$

فعالیت ۳ـ۴

با یک اهم‌متر، مقاومت رشته‌ی سیم داخل لامپ ۱۰۰ واتی را اندازه‌گیری کنید.



شکل ۳ـ۱۱

سپس با استفاده از رابطه‌ی ۳ــ۱۲ و با داشتن مشخصات روی لامپ مقاومت آن را محاسبه کنید. نتیجه‌ی محاسبه را با مقدار اندازه‌گیری مقایسه کنید و نتیجه را پس از بحث گروهی گزارش دهید.

فعالیت ۳ــ۵

با استفاده از نتیجه‌ی به‌دست‌آمده از فعّالیت ۳ــ۴، دمای رشته‌ی سیم داخل لامپ را در حال روشن برآورد کنید (رشته سیم لامپ از جنس تنگستن است. ضریب دمایی آن‌را با مراجعه به جدول ۳ــ۱ به‌دست آورید.)

مثال ۳ــ۵

بر روی یک بخاری برقی رقم‌های ۲۲۰V و ۱۵۰۰W ثبت شده است. الف ــ این بخاری هنگامی که به ولتاژ ۲۲۰ ولت وصل است، در هر دقیقه چه مقدار انرژی الکتریکی برحسب کیلو وات ساعت مصرف می‌کند؟ ب ــ مقاومت سیم گرم‌کن آن چند اهم است؟

حل: الف ــ بنا به رابطه‌ی ۳ــ۱۰ داریم:

$$U = Pt \Rightarrow U = ۱۵۰۰ \times ۶۰ = ۹ \times ۱۰^{۴} J$$

$$U = \frac{۹ \times ۱۰^{۴}}{۳/۶ \times ۱۰^{۶}} = \frac{۹}{۳/۶ \times ۱۰^{۲}} = \frac{۱}{۴۰} = ۰/۰۲۵ kWh$$

ب ــ با استفاده از رابطه‌ی۳ــ۱۲

$$P = \frac{V^{۲}}{R} \Rightarrow ۱۵۰۰ = \frac{۲۲۰ \times ۲۲۰}{R}$$

$$R = \frac{۲۲ \times ۲۲}{۱۵} = ۳۲/۲۶ \Omega$$

آثار تخریبی الکتریسیته بر بدن انسان

بررسی آثار الکتریسیته بر بدن انسان از دو جنبه اهمیت دارد. نخست آن که در بسیاری از موارد در اثر بی‌احتیاطی و یا حادثه‌های پیش‌بینی نشده، افرادی در معرض شوک الکتریکی قرار می‌گیرند، و دیگر اینکه برای برخی از بیماری‌ها می‌توان از شوک الکتریکی به‌عنوان یکی از راه‌های معالجه بهره جست.

تجربه نشان داده است که آثار تخریبی با شدت جریان الکتریکی متناسب است نه با ولتاژ. می‌دانیم که شدت جریان الکتریکی با ولتاژ نسبت مستقیم و با مقاومت الکتریکی نسبت عکس دارد.

در بیشتر موارد در حوادث برق‌گرفتگی، تماس بدن با منبع ولتاژ کامل نیست، و مقاومت الکتریکی زیاد منطقه‌ی تماس باعث می‌شود که شدت جریانی که شارش می‌کند بسیار کوچک باشد. ولی اگر شخصی بر زمین خیس و یا در آب ایستاده باشد و بین نقطه‌ای از بدن او با منبع ولتاژ تماس خوبی برقرار شود، جریان نسبتاً زیادی از بدن وی عبور خواهد کرد. در این صورت حتی اگر ولتاژ کم هم باشد، جریان می‌تواند آن‌قدر زیاد باشد که موجب مرگ شود. از سوی دیگر اگر مقاومت الکتریکی منطقه‌ی تماس زیاد باشد و مثلاً شخصی بر پایه‌های عایق ایستاده باشد، این خطر وجود ندارد. حتی در ولتاژ زیاد هم که جریان مقدار قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند تنها در محل تماس که مقاومت الکتریکی زیاد است گرمای زیادی ایجاد می‌شود و سوختگی‌های سطحی پوستی روی خواهد داد.

دستگاه مرکزی اعصاب انسان در مقابل حادثه‌های الکتریکی بسیار آسیب‌پذیر است. اگر جریانی که در یک شوک الکتریکی از مغز می‌گذرد بزرگ باشد، حتی ممکن است منجر به بیهوشی کامل و حتی در برخی موارد موجب فراموشی می‌شود. به طوری که بیمار زمان‌های قبل از وقوع حادثه را نیز به یاد نمی‌آورد. مرگ در اثر شوک الکتریکی معمولاً در اثر ایست قلبی یا تنفسی روی می‌دهد.

تمرین ۳ـ۳

روی یک لامپ الکتریکی رقم‌های $220V$ و $100W$ ثبت شده است.

الف) انرژی الکتریکی مصرفی این لامپ هنگامی که به ولتاژ ۲۲۰ ولت متصل است، در مدت ۱۰ ساعت چند کیلووات ساعت است؟

ب) اگر این لامپ به اختلاف پتانسیل ۱۸۰ ولت وصل شود، با فرض ثابت ماندن مقاومت توان مصرفی آن چه‌قدر می‌شود؟

۳ــ۶ــ نیروی محرکه‌ی مولد

بارهای الکتریکی ضمن شارش در مدار، انرژی جنبشی‌ای را که به‌دست آورده‌اند از دست می‌دهند. کارمولّد این است که این انرژی را دوباره تأمین کند. همان‌طور که دیدیم، بارهای الکتریکی در رسانا از پتانسیل بالاتر به پتانسیل پایین‌تر شارش می‌کنند و وارد مولّد می‌شوند. مولّد با صرف انرژی، بارهای الکتریکی را از پتانسیل پایین‌تر به پتانسیل بالاتر سوق می‌دهد و سبب شارش آن‌ها در مدار می‌شود. بارهای الکتریکی هنگام شارش در رسانا، انرژی خود را از دست می‌دهند. برای این‌که شارش بار در مدار تداوم یابد، این انرژی باید به‌وسیله‌ی مولّد تأمین شود. همان‌طور که در فیزیک ۱ و آزمایشگاه خواندید، کار مولّد در این مورد نظیر کار تلمبه‌ای است که آب را از سطح زمین یا عمق چاه (پتانسیل گرانشی پایین‌تر) تا ارتفاع معینی (پتانسیل گرانشی بالاتر) بالا می‌برد. با این کار، آب انرژی پتانسیل لازم را برای جریان‌یافتن و به‌کارانداختن یک پروانه (توربین) کسب می‌کند.

تا زمانی که مولد بتواند انرژی لازم را به بارهای الکتریکی بدهد، شارش و در نتیجه، جریان الکتریکی در مدار ادامه می‌یابد.

انرژی‌ای را که مولّد به واحد بار الکتریکی (یعنی یک کولن) می‌دهد تا در مدار شارش کند، **نیروی محرکه‌ی مولّد** نامیده می‌شود. اگر مولّد انرژی U را به بار q بدهد تا آن‌را از پایانه‌ی منفی به پایانه‌ی مثبت منتقل کند، بنا به تعریف نیروی محرکه‌ی مولد ــ که آن‌را با نِماد ε نشان می‌دهیم ــ می‌توان نوشت :

$$\varepsilon = \frac{U}{q} \qquad (۳ـ۱۴)$$

یکای نیروی محرکه ژول بر کولن $(\frac{J}{C})$ است یا ولت[1] نامیده می‌شود. درنتیجه، انرژی‌ای که مولد به بار q می‌دهد، برابر εq است.

۱ــ واژه‌ی ولت به افتخار الکساندر ولتا، سازنده‌ی اولین پیل الکتریکی، انتخاب شده است.

۳ــ۷ــ مدارهای تک حلقه

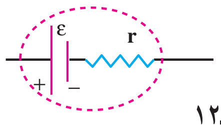
یک مدار الکتریکی ساده‌ی تک حلقه از یک یا چند مولّد و یک یا چند مقاومت تشکیل شده است که یکی پس از دیگری به کمک سیم‌های رابط (که بدون مقاومت الکتریکی فرض می‌شوند) به دنبال هم بسته شده‌اند. شدت جریان در تمام قسمت‌های مدار یکسان است.

تمرین ۳ـ۴

با استفاده از قانون پایستگی بار، توضیح دهید چرا در مدار تک حلقه شدت جریان در همه‌ی قسمت‌های مدار یکسان است؟

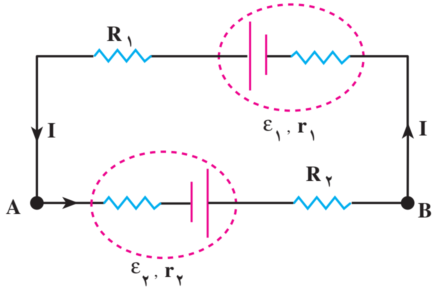
در این بخش، قاعده‌ی کلی برای محاسبه‌ی اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از مدار و محاسبه‌ی شدت جریان مدار را شرح می‌دهیم.

هر مولّد دارای مقاومتی است که آن را با نماد (r) نشان می‌دهیم و آن را مقاومت درونی مولد می‌نامیم. در شکل ۳ــ۱۲ یک مولّد به نیروی محرکه‌ی ε و مقاومت درونی r نشان داده شده است.



شکل ۳ــ۱۲

الف ــ محاسبه‌ی اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از مدار: شکل ۳ــ۱۳ یک مدار تک‌حلقه را نشان می‌دهد. مدار شامل مقاومت‌های R_1 و R_2 و مولّدهای ε_1 و ε_2 است.



شکل ۳ــ۱۳

با توجه به آن‌چه در بخش‌های قبل توضیح داده شد، معلوم می‌شود که تغییر پتانسیل (یعنی کاهش یا افزایش پتانسیل) بین دو نقطه از مدار به جهت جریان و اجزایی که بین آن دو نقطه قرار دارند، بستگی دارد.

در مداری که در شکل ۳ــ۱۳ می‌بینید، اگر بار الکتریکی q از نقطه‌ی A در جهت نشان‌داده‌شده حرکت کند، انرژی پتانسیل آن هنگام عبور از باتری به‌اندازه‌ی $\varepsilon_2 q$ افزایش و به‌اندازه‌ی $Ir_2 q$ کاهش می‌یابد. در عبور از مقاومت R_2 انرژی پتانسیل آن به اندازه‌ی $IR_2 q$ کاهش می‌یابد. به همین ترتیب،هنگام عبور از باتری ε_1 افزایش انرژی $\varepsilon_1 q$ و کاهش انرژی $Ir_1 q$ را خواهیم داشت. در R_1 انرژی پتانسیل بار q به‌اندازه‌ی $IR_1 q$ کاهش می‌یابد. هنگامی که بار q به نقطه‌ی A برمی‌گردد، چون تمام انرژی از دست‌رفته‌ی آن توسط باتری‌ها تأمین شده است، بنا به اصل پایستگی انرژی، باید بار q در این نقطه همان انرژی اولیه را داشته باشد ؛ بنابراین،

$$U_A + \varepsilon_2 q - Ir_2 q - IR_2 q - Ir_1 q + \varepsilon_1 q - IR_1 q = U_A$$

اگر طرفین این رابطه را بر q تقسیم کنیم، رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$V_A + \varepsilon_2 - Ir_2 - IR_2 - Ir_1 + \varepsilon_1 - IR_1 = V_A \qquad (۳ــ۱۵)$$

با توجه به رابطه‌ی ۳ــ۱۵ دستورالعمل زیر به‌دست می‌آید.

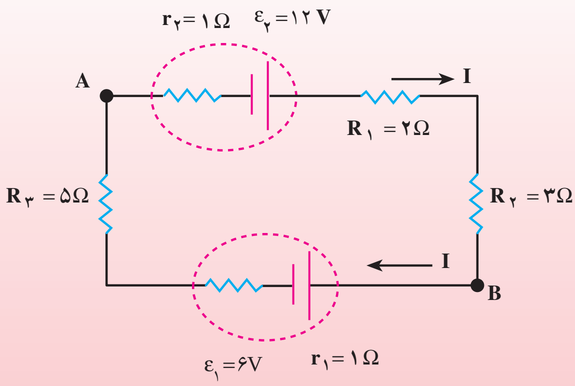
۱ــ هرگاه روی مدار در جهت جریان از مقاومت R یا r بگذریم، پتانسیل به‌اندازه‌ی IR یا Ir کاهش می‌یابد و اگر در خلاف جهت جریان از مقاومت‌ها بگذریم، پتانسیل به اندازه‌ی IR یا Ir افزایش می‌یابد.

۲ــ هرگاه برای گذر از مولّد (بدون توجه به جهت جریان) از پایانه‌ی منفی به طرف پایانه‌ی مثبت بگذریم، پتانسیل به‌اندازه‌ی نیروی محرکه‌ی مولّد افزایش می‌یابد. اگر ضمن گذر از مولّد (بدون توجه به جهت جریان) از پایانه‌ی مثبت به پایانه‌ی منفی برویم، پتانسیل به‌اندازه‌ی نیروی محرکه‌ی مولّد کاهش می‌یابد.

بنابراین، برای محاسبه‌ی اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از مدار، ابتدا پتانسیل نقطه‌ی اول (مثلاً V_A) را می‌نویسیم. آن‌گاه از این نقطه روی مدار در جهت دلخواه به طرف نقطه‌ی دوم می‌رویم و ضمن گذر از هر جزء، تغییر پتانسیل آن جزء را اضافه می‌کنیم تا به نقطه‌ی دوم برسیم. حاصل، برابر پتانسیل نقطه‌ی دوم است.

مثال ۳ـ۶

در یک مدار تک حلقه مطابق شکل ۳ـ۱۴ شدت جریان در جهت نشان داده‌شده ۰/۵ آمپر است. اختلاف پتانسیل بین دو نقطه‌ی A و B (یعنی $V_B - V_A$) چه اندازه است؟



شکل ۳ـ۱۴

حل: اگر در جهت جریان از نقطه‌ی A به‌سمت نقطه‌ی B جلو رویم، می‌توانیم بنویسیم :

$$V_A - Ir_2 + \varepsilon_2 - IR_1 - IR_2 = V_B$$

$$-0/5\times1+12-0/5\times2-0/5\times3 = V_B - V_A$$

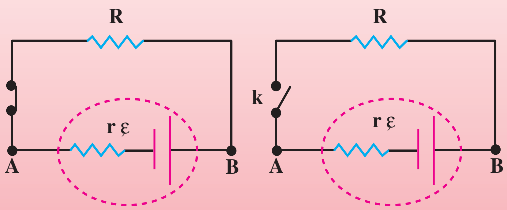
$V_B - V_A = 9$ ولت

مثال ۳ـ۷

در مدار شکل ۳ـ۱۵ اختلاف پتانسیل دو سر مولّد را در دو حالت زیر حساب کنید.

الف) کلید k باز است.

ب)کلید k بسته است و جریان I از مدار می‌گذرد.



ب شکل ۳ـ۱۵ الف

حل: الف) در حالتی که کلید باز است، $I = 0$ و داریم :

$$V_A - 0 \times r + \varepsilon = V_B$$

$$V_B - V_A = \varepsilon$$

ب) اگر از نقطه‌ی A در جهت جریان به سمت B جلو برویم، می‌توانیم بنویسیم :

$$V_A - Ir + \varepsilon = V_B$$

اختلاف پتانسیل دو سر مولّد $\quad V_B - V_A = \varepsilon - Ir$

همان‌طور که در بند الف مثال ۳ــ۷ دیدید، در حالتی که جریان از مولّد نگذرد $(Ir = 0)$ اختلاف پتانسیل دو سر مولّد با نیروی محرکه مولد برابر است ؛ بنابراین، نیروی محرکه‌ی مولّد برابر اختلاف پتانسیل دو سر مولّد است وقتی که جریانی از آن نگذرد.

می‌دانیم که ولت‌سنج وسیله ای است با مقاومت زیاد ؛ بنابراین، اگر پایانه‌های یک مولد را فقط به دو سر یک ولت‌سنج ببندیم، چون عملاً جریانی برقرار نمی‌شود، عددی که ولت سنج نشان می‌دهد، برابر نیروی محرکه‌ی مولد است. از طرفی، در بند ب مثال ۳ــ۷ دیدید که وقتی جریان I از مولّد می‌گذرد،اختلاف پتانسیل دو سر مولد به اندازه‌ی Ir از نیروی محرکه‌ی مولّد کم‌تر است . Ir افت پتانسیل در مولّد است.

فعالیت ۳ــ۶

وقتی باتری اتومبیل فرسوده می‌شود، مقاومت درونی آن افزایش می‌یابد. چرا این باتری نمی‌تواند اتومبیل را روشن کند.

فعالیت ۳ــ۷

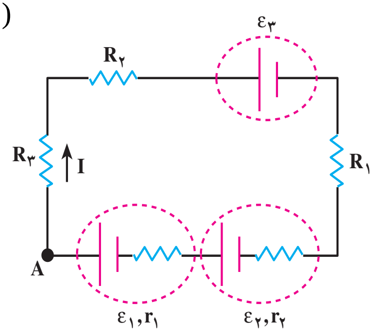
می‌دانیم که نیروی محرکه‌ی یک باتری اتومبیل ۱۲ ولت و نیروی محرکه‌ی هر باتری قلمی ۱/۵ ولت است. به‌نظر شما، اگر ۸ باتری قلمی را به‌طور متوالی به هم وصل کنیم (یعنی پایانه‌ی مثبت یکی را به‌طور پی در پی به پایانه‌ی منفی دیگری وصل کنیم) تا نیروی محرکه‌ی کل آن‌ها ۱۲ ولت شود، آیا با این مجموعه می‌توان اتومبیل را روشن کرد؟ چرا؟

ب ــ محاسبه‌ی شدت جریان: برای محاسبه‌ی شدت‌جریان در یک مدار تک‌حلقه، ابتدا برای جریان جهت دلخواهی انتخاب می‌کنیم و سپس با توجه به دو قاعده‌ای که برای اختلاف پتانسیل گفته شد، از یک نقطه روی مدار شروع می‌کنیم وتغییر پتانسیل دو سر هریک از اجزای مدار را می‌نویسیم تا دوباره به نقطه‌ی شروع برسیم. از رابطه‌ای که به این ترتیب به‌دست می‌آید، می‌توان شدت جریان را محاسبه کرد. برای مثال، در مدار شکل ۳ــ۱۶ برای محاسبه‌ی جریان، ابتدا جریان را در جهت نشان داده شده انتخاب می‌کنیم و سپس از نقطه‌ی A روی مدار در جهت جریان جلو می‌رویم. به این ترتیب، خواهیم داشت:

$$V_A - IR_3 - IR_2 - \varepsilon_3 - IR_1 - Ir_2 + \varepsilon_2 - Ir_1 + \varepsilon_1 = V_A$$

$$\varepsilon_2 + \varepsilon_1 - \varepsilon_3 = I(R_3 + R_2 + R_1 + r_2 + r_1)$$

$$I = \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{R_3 + R_2 + R_1 + r_2 + r_1}$$



شکل ۳ــ۱۶

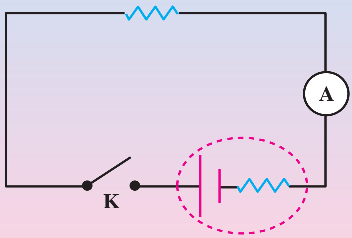
با این روش، اگر جریان به‌دست آمده مثبت باشد، معلوم می‌شود که جهت انتخاب شده درست است و اگر جریانی که به‌دست می‌آید منفی باشد، معلوم می‌شود جهت جریان در مدار خلاف جهت انتخاب شده است.

آزمایش ۳ــ۳

اندازه‌گیری مقاومت درونی مولّد

وسیله‌های آزمایش: باتری ۹ ولت، ولت‌سنج، آمپرسنج و یک مقاومت، کلید قطع و وصل.

۱ــ مدار را مطابق شکل ۳ــ۱۷ ببندید.



شکل ۳ــ۱۷

۲ــ در حالتی که کلید باز است، اختلاف پتانسیل دو سر باتری را با ولت‌سنج اندازه بگیرید.

۳ــ کلید را وصل کنید و در این حالت، شدت جریان و اختلاف پتانسیل دو سر باتری را بخوانید. به کمک این دو آزمایش، با استفاده از رابطه‌ای که در مثال ۳ــ۷ برای اختلاف پتانسیل دو سر مولّد به‌دست آمد، مقاومت درونی باتری را محاسبه کنید.

توان مولد: با توجه به رابطه‌ی ۳ــ۱۴ در بخش ۳ــ۶ اگر جریانی که از مولّد می‌گذرد I باشد، داریم :

$$U = \varepsilon It \qquad (۳ــ۱۶)$$

از آن‌جا توان تولیدشده به‌وسیله‌ی مولد از رابطه‌ی ۳ــ۱۷ به‌دست می‌آید.

$$P = \frac{U}{t} = \varepsilon I \qquad (۳ــ۱۷)$$

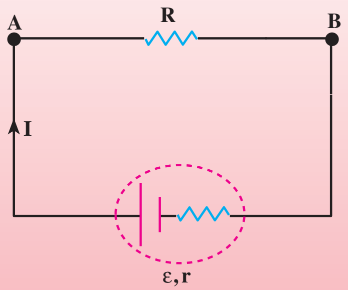
بخشی از این توان تولیدی به دلیل مقاومت درونی مولد، در درون مولّد مصرف می‌شود، که بنا به آن چه در مورد توان مصرفی در یک مقاومت دیدیم، این مقدار برابر rI^2 است ؛ بنابراین، توان مفید مولد (یا توان خروجی) از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$P = \varepsilon I - rI^2 \qquad (۳ــ۱۸)$$

مثال ۳ــ۸

دوسر مقاومت ۳/۵ اُهمی را به یک باتری به نیروی محرکه‌ی ε و مقاومت درونی ۱Ω بسته‌ایم. شدت جریان در مدار ۲A شده است.

الف) اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت و توان مصرف شده در آن را حساب کنید.



شکل ۳ــ۱۸

ب) نیروی محرّکه‌ی مولد و توان تولیدی آن چه اندازه است؟

حل: الف) با توجه به شکل ۳ــ۱۸ می‌توان نوشت :

اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت

$$V_A - IR = V_B \Rightarrow V_A - V_B = IR = ۲ \times ۳/۵ = ۷V$$

توان مصرفی در مقاومت $P = RI^۲ \Rightarrow P = ۳/۵ \times ۴ = ۱۴W$

ب) $V_A - IR - Ir + \varepsilon = V_A$

نیروی محرّکه‌ی مولّد $-۲ \times ۳/۵ - ۲ \times ۱ + \varepsilon = ۰ \Rightarrow \varepsilon = ۹V$

توان تولیدی مولّد $P = \varepsilon I \Rightarrow P = ۹ \times ۲ = ۱۸W$

تمرین ۳ ــ ۵

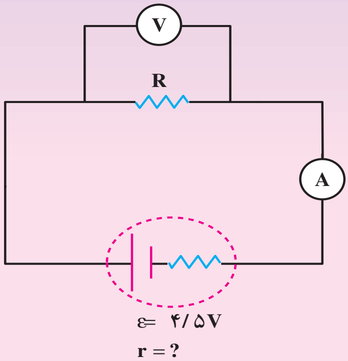
در مدار شکل۳ــ۱۹ آمپرسنج ۰/۵A و ولت‌سنج ۴ ولت را نشان می‌دهد.

الف) مقاومت R را محاسبه کنید.

ب)توان مصرف شده در مقاومت R و توان تولیدی مولّد را محاسبه کنید.

پ)افت پتانسیل در مولّد را محاسبه کنید.

ت) مقاومت درونی مولّد را محاسبه کنید.

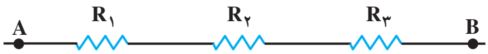


شکل ۳ــ۱۹

۳ــ ۸ ــ به هم بستن مقاومت‌ها

در مدارهای الکتریکی متداول معمولاً مقاومت‌ها به صورت‌های متفاوت به هم متصل می‌شوند. برخی از این مدارها می‌توانند بسیار پیچیده باشند. در ادامه به بررسی دو نوع ساده‌ی به هم بستن مقاومت‌ها می‌پردازیم. اکثر مدارهای پیچیده را می‌توانیم با استفاده از روابطی که برای دو نوع به هم بستن ساده‌ی زیر به‌دست می‌آوریم، بررسی کنیم.

الف ــ به هم بستن متوالی مقاومت‌ها: در این روش، مقاومت‌ها مطابق شکل ۳ــ۲۰ به هم بسته می‌شوند و در مدار قرار می‌گیرند.



شکل ۳ــ۲۰

در به هم بستن مقاومت‌ها به‌طور متوالی، هر مقاومت با مقاومت بعدی در یک سر مشترک است. اگر دو سر A و B را به اختلاف پتانسیل ثابتی ببندیم، جریان I از هر یک از مقاومت‌ها می‌گذرد. با توجه به شکل ۳ــ۲۰ و روش محاسبه‌ی اختلاف پتانسیل بین دو نقطه در مدار تک حلقه می‌توان نوشت:

$$V_A - IR_1 - IR_2 - IR_3 = V_B \qquad (۳ـ۱۹)$$

و از آن‌جا خواهیم داشت:

$$V_A - V_B = IR_1 + IR_2 + IR_3 \qquad (۳ـ۲۰)$$

مقاومت معادل هر مجموعه از این مقاومت‌ها مقاومتی است که اگر به‌جای آن‌ها به همان اختلاف پتانسیل $V_A - V_B$ وصل شود، همان شدت جریان از آن عبور کند؛ بنابراین، اگر مقاومت معادل این مجموعه را R بگیریم، خواهیم داشت:

$$V_A - V_B = IR \qquad (۳ـ۲۱)$$

$$IR_1 + IR_2 + IR_3 = IR \qquad (۳ـ۲۲)$$

یا:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \qquad (۳ـ۲۳)$$

بدیهی است که اگر به‌جای سه مقاومت، n مقاومت متوالی داشته باشیم، مقاومت معادل آن‌ها از رابطه‌ی ۳ــ۲۳ به‌دست می‌آید.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots \qquad (۳ـ۲۳)$$

مثال ۳ـ۹

مقاومت‌های $R_۱ = ۲\Omega$ و $R_۲ = ۴\Omega$ و $R_۳ = ۱\Omega$ و $R_۴ = ۳\Omega$ را به‌طور متوالی به هم بسته‌ایم.

الف ــ مقاومت معادل مجموعه‌ی مقاومت‌ها را حساب کنید. اگر این مجموعه از مقاومت‌ها را به دو سر مولدی به نیروی محرکه‌ی ۶ ولت و مقاومت درونی ناچیز ببندیم، شدت جریان در مدار چه‌قدر می‌شود؟

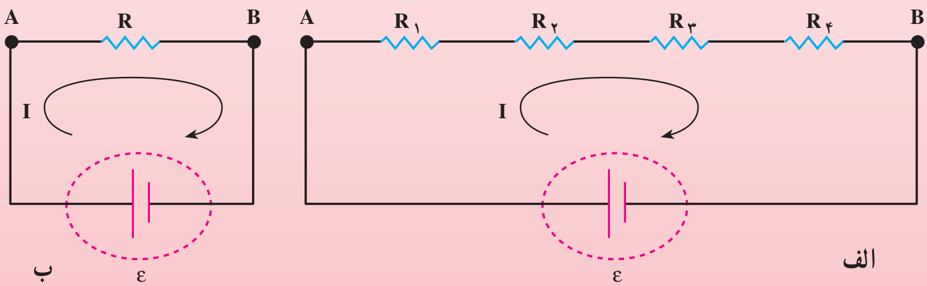
ب ــ توان مصرفی هر یک از مقاومت‌ها و مجموع توان مصرفی هر مقاومت و توان مصرفی کل را محاسبه و با هم مقایسه کنید.

حل: الف ــ بنا به رابطه‌ی ۳ــ۲۳ داریم :

$$R = R_۱ + R_۲ + R_۳ + R_۴$$

مقاومت معادل $R = ۲ + ۴ + ۱ + ۳ = ۱۰\Omega$

در شکل ۳ــ۲۱ الف و ب به‌ترتیب به هم بستن مقاومت‌های متوالی را به باتری و قرار گرفتن مقاومت معادل را به‌جای آن‌ها مشاهده می‌کنید.



شکل ۳ــ۲۱

در این حالت، بنا به آن‌چه در مورد مدارهای تک‌حلقه گفتیم، شدت جریان مدار $I = \frac{\varepsilon}{R} \Rightarrow I = \frac{۶}{۱۰} = ۰/۶A$ است.

ب ــ

$$P_۱ = R_۱ I^۲ \rightarrow P_۱ = ۲ \times ۰/۳۶ = ۰/۷۲W$$

$$P_۲ = ۴ \times ۰/۳۶ = ۱/۴۴W$$

$$P_۳ = ۱ \times ۰/۳۶ = ۰/۳۶W$$

$$P_{۴} = ۳ \times ۰/۳۶ = ۱/۰۸ W$$

$$P = RI^{۲} \Rightarrow P = ۱۰ \times ۰/۳۶ = ۳/۶ W$$

$$P = P_{۱} + P_{۲} + P_{۳} + P_{۴} = ۰/۷۲ + ۱/۴۴ + ۰/۳۶ + ۱/۰۸ = ۳/۶ W$$

بنابراین توان مصرفی کل برابر مجموع توان مصرفی مقاومت‌هاست.

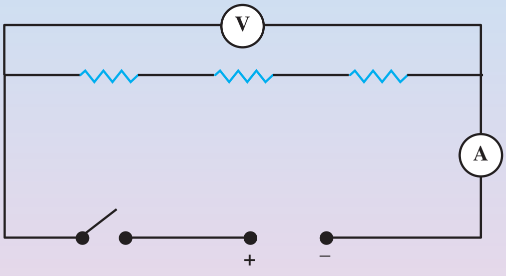
تمرین ۳ـ۶

می‌خواهیم تعدادی لامپ ۱۲ ولتی و ۲۶ واتی را با برق ۱۸۰ ولت روشن کنیم. چند عدد از این لامپ‌ها را به‌طور متوالی به هم ببندیم تا بدون آن‌که بسوزند، توان مصرفی هر کدام همان ۲۶ وات باشد؟

آزمایش ۳ـ۴

وسیله‌های لازم: چند مقاومت $۱/۷\Omega$، ۱۲Ω، ۱۰Ω و ۱۵Ω، سیم رابط، ولت‌سنج، آمپرسنج، کلید قطع و وصل، منبع تغذیه و اهم‌متر.

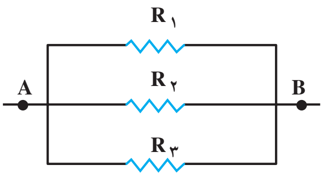
۱ـ ابتدا سه یا چهار مقاومت را به‌طور متوالی به هم ببندید و پس از آن با این مقاومت‌ها مداری مطابق شکل ۳ـ۲۲ ترتیب دهید.



شکل ۳ـ۲۲

۲ـ با اندازه‌گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه‌ی مقاومت‌ها از رابطه‌ی $R = \frac{V}{I}$ مقاومت معادل را اندازه بگیرید و پس از آن، با استفاده از اهم‌متر، مقاومت معادل مجموعه‌ی مقاومت‌ها را اندازه‌گیری کنید. نتیجه را با آن‌چه از رابطه‌ی $R = \frac{V}{I}$ به‌دست آورده‌اید، مقایسه نمایید.

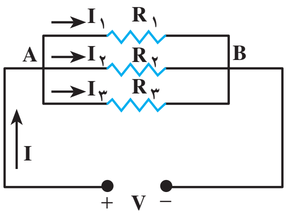
ب ــ به هم بستن مقاومت‌ها به‌طور موازی: شکل ۳ــ۲۳ سه مقاومت را نشان می‌دهد که بین دو نقطه‌ی A و B به‌طور موازی به هم بسته شده‌اند.



شکل ۳ــ۲۳

در به هم بستن موازی مقاومت‌ها یک سر همه‌ی مقاومت‌ها به یک نقطه (مثلاً نقطه‌ی A) و سر دیگر همه‌ی آن‌ها نیز به یک نقطه (مثلاً نقطه‌ی B) بسته شده است. در این حالت، اگر دو سر مجموعه مطابق شکل ۳ــ۲۴ به اختلاف پتانسیل V وصل شود، جریان الکتریکی در هر یک از مقاومت‌ها برقرار می‌گردد. بنابر اصل پایستگی بار، باید شدت جریان در شاخه‌ی اصلی با مجموع شدت جریان‌هایی که در هر یک از مقاومت‌ها برقرار شده است، برابر باشد.

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \qquad (۳ــ۲۴)$$



شکل ۳ــ۲۴

فعالیت ۳ــ۸

آزمایشی را طراحی کنید که درستی رابطه‌ی ۳ــ۲۴ را نشان دهد.

در به هم‌بستن مقاومت‌ها به‌طور موازی چون یک سر مقاومت‌ها به نقطه‌ی A و سر دیگر به نقطه‌ی B وصل است بنابراین ولتاژ یک سر همه مقاومت‌ها V_A و سر دیگر V_B است. به عبارت دیگر، در این حالت اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت‌های موازی یکسان است؛ بنابراین، براساس قانون اهم می‌توان نوشت:

$$I_1 = \frac{V}{R_1} \text{ و } I_2 = \frac{V}{R_2} \text{ و } I_3 = \frac{V}{R_3} \qquad (۳ــ۲۵)$$

اگر مقاومت معادل این مقاومت‌های موازی را با R نشان دهیم، برای مقاومت معادل آن‌ها نیز داریم :

$$I = \frac{V}{R} \qquad (۳\text{ـ}۲۶)$$

از رابطه‌های ۳ـ۲۴ و ۳ـ۲۵ و ۳ـ۲۶ نتیجه می‌شود :

$$\frac{V}{R} = \frac{V}{R_۱} + \frac{V}{R_۲} + \frac{V}{R_۳}$$

یا :

$$\frac{۱}{R} = \frac{۱}{R_۱} + \frac{۱}{R_۲} + \frac{۱}{R_۳} \qquad (۳\text{ـ}۲۷)$$

بنابراین، در به هم بستن مقاومت‌ها به‌طور موازی، وارون مقاومت معادل برابر مجموع وارون مقاومت‌هاست.

تمرین ۳ـ۷

نشان دهید وقتی دو مقاومت به‌طور موازی به یک‌دیگر وصل شوند، نسبت شدت جریان‌های آن‌ها به نسبت وارون مقاومت‌هاست.

مثال ۳ـ۱۰

مقاومت‌های $R_۱ = ۶\Omega$ و $R_۲ = ۴\Omega$ و $R_۳ = ۱۲\Omega$ و $R_۴ = ۶\Omega$ را به‌طور موازی به هم می‌بندیم و در دو سر آن‌ها اختلاف پتانسیل ۱۵ ولت برقرار می‌کنیم.

الف ــ مقاومت معادل و شدت جریان کل را به‌دست آورید.

ب ــ شدت جریان را در هر یک از مقاومت‌ها حساب کنید.

پ ــ توان مصرفی هر مقاومت و توان مصرفی کل را محاسبه کنید.

حل: الف ــ برای محاسبه‌ی مقاومت معادل بنا به رابطه‌ی ۳ـ۲۷ داریم :

$$\frac{۱}{R} = \frac{۱}{R_۱} + \frac{۱}{R_۲} + \frac{۱}{R_۳} + \frac{۱}{R_۴}$$

$$\frac{۱}{R} = \frac{۱}{۶} + \frac{۱}{۴} + \frac{۱}{۱۲} + \frac{۱}{۶} = \frac{۲+۳+۱+۲}{۱۲} = \frac{۸}{۱۲}$$

مقاومت معادل $R=\frac{۱۲}{۸}=۱/۵\Omega$

شدت جریان کل از رابطه‌ی $I=\frac{V}{R}$ به‌دست می‌آید.

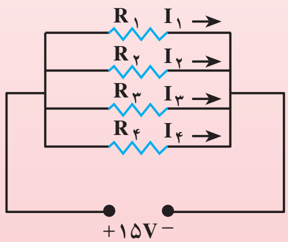
شدت جریان کل $I=\frac{۱۵}{۱/۵}=۱۰A$

ب ــ با توجه به شکل ۳ــ۲۵ برای محاسبه‌ی شدت جریان در هر یک از مقاومت‌ها، می‌توان نوشت :

$$V=I_۱R_۱=I_۲R_۲=I_۳R_۳=I_۴R_۴$$

$$I_۱=\frac{۱۵}{۶}=۲/۵A \text{ و } I_۲=\frac{۱۵}{۴}=۳/۷۵A$$

$$I_۳=\frac{۱۵}{۱۲}=۱/۲۵A \text{ و } I_۴=\frac{۱۵}{۶}=۲/۵A$$



شکل ۳ــ۲۵

همان‌طور که می‌بینید، شدت جریان به نسبت وارون مقاومت‌ها توزیع شده است.

بنا به رابطه‌ی ۳ــ۱۱ داریم :

$$P=VI$$

$$P_۱=۱۵\times۲/۵=۳۷/۵\ W \text{ و } P_۲=۱۵\times۳/۷۵=۵۶/۲۵W$$

$$P_۳=۱۵\times۱/۲۵=۱۸/۷۵W \text{ و } P_۴=۱۵\times۲/۵=۳۷/۵W$$

برای محاسبه‌ی توان کل با استفاده از مقاومت معادل می‌توان نوشت :

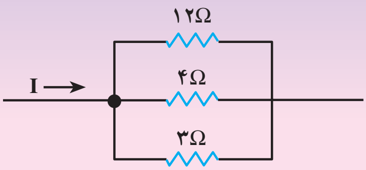
$$P=\frac{V^۲}{R}=\frac{۲۲۵}{۱/۵}=۱۵۰W$$

همان‌طور که پیش‌تر هم دیدیم، برای محاسبه‌ی توان کل می‌توانستیم توان مصرفی در مقاومت‌ها را با هم جمع کنیم.

$$P=P_۱+P_۲+P_۳+P_۴=۳۷/۵+۵۶/۲۵+۱۸/۷۵+۳۷/۵=۱۵۰W$$

تمرین ۳ـ ۸

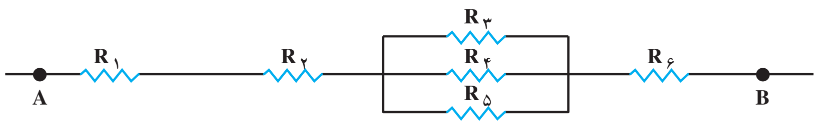
درشکل ۳ــ۲۶ قسمتی از یک مدار را مشاهده می‌کنید. اگر توان مصرفی در مقاومت ۱۲ اُهمی ۳ وات باشد، شدت جریان درمقاومت‌های ۴Ω و ۳Ω وشدت جریان کل چه‌قدر است؟



شکل ۳ــ۲۶

در مواردی ممکن است تعدادی از مقاومت‌ها به‌طور متوالی و تعدادی دیگر به‌صورت موازی به هم بسته شده باشند. در شکل ۳ــ۲۷ تعدادی مقاومت شامل مقاومت‌های موازی ($R_{۵}$ و $R_{۴}$ و $R_{۳}$) را مشاهده می‌کنید که با سه مقاومت $R_{۱}$ و $R_{۲}$ و $R_{۶}$ به‌طور متوالی بسته شده‌اند. در این موارد که مقاومت‌ها شامل مجموعه‌ای موازی و متوالی است، برای محاسبه‌ی مقاومت معادل مجموعه، می‌توان به‌جای مقاومت‌های موازی در هر قسمت معادل آن‌ها را قرار داد و پس از آن، مقاومت معادل مجموعه‌ی متوالی را محاسبه کرد.

در شکل ۳ــ۲۷ اگر مقاومت معادل $R_{۳}$ و $R_{۴}$ و $R_{۵}$ برابر R باشد، به‌جای مقاومت‌های شکل می‌توان مجموعه‌ی مقاومت‌های شکل ۳ــ۲۸ را نشاند.



شکل ۳ــ۲۷



جانشانی مقاومت‌های شکل ۳ــ۲۷

شکل ۳ــ۲۸

به همین ترتیب، به‌جای مقاومت‌های شکل ۳ــ۲۸ می‌توان مقاومت معادل آن‌ها را مطابق شکل ۳ــ۲۹ نشاند.



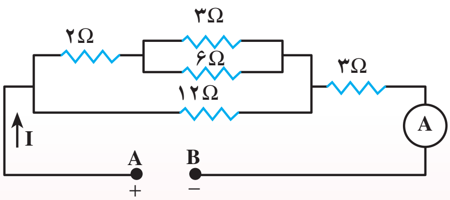
شکل ۳ــ۲۹

$$R' = R_{۱} + R_{۲} + R + R_{۶}$$

R' مقاومت معادل مقاومت‌های شکل ۳ــ۲۷ است.

مثال ۳ـ۱۱

در مدار شکل ۳ـ۳۰ اختلاف پتانسیل بین دو نقطه‌ی B و A ، ۲۴ ولت است. شدت جریانی را که آمپرسنج (A) نشان می‌دهد، چند آمپر است؟



شکل ۳ـ۳۰

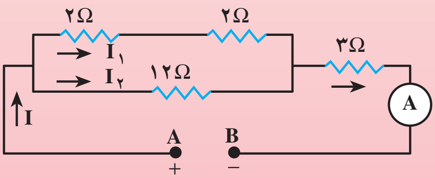
حل: برای محاسبه‌ی شدت جریان کل، نخست با اعمال ساده‌سازی‌های نشان داده شده در شکل‌های ۳ـ۳۱ الف تا ت مدار معادل شکل ۳ـ۳۰ را به‌دست می‌آوریم.

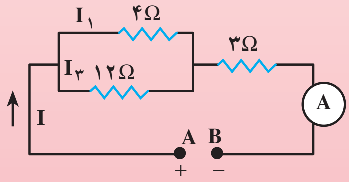
الف ــ مقاومت معادل دو مقاومت موازی ۳Ω و ۶Ω برابر ۲Ω است.

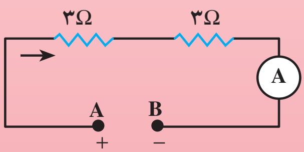
ب ــ مقاومت معادل دو مقاومت متوالی ۲Ω و ۲Ω برابر ۴Ω است.

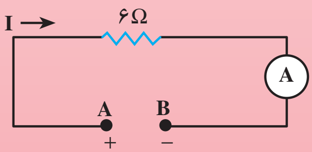
پ ــ مقاومت معادل دو مقاومت موازی ۴Ω و ۱۲Ω برابر ۳Ω است.

ت ــ مقاومت معادل دو مقاومت متوالی ۳Ω و ۳Ω ، یعنی مقاومت معادل مدار شکل ۳ـ۳۰ ، برابر ۶Ω است. در این حالت، شدت جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد، $I = \frac{V}{R} = \frac{۲۴}{۶} = ۴A$ است.







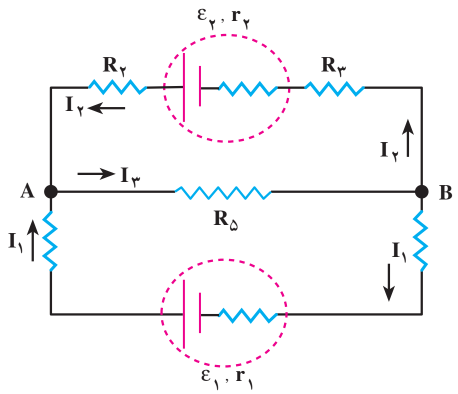


شکل ۳ـ۳۱

۳ــ۹ــ قانون کیرشهف

در مثال‌های ۳ــ۹، ۳ــ۱۰ و ۳ــ۱۱ با استفاده از مقاومت معادل، مدار را ساده کردیم و پاسخ مورد نظر را به‌دست آوردیم. این روش ساده‌سازی همواره قابل استفاده نیست. به‌ویژه در مدارهایی که شامل باتری‌های متعددند. این‌گونه مدارها را می‌توان با به‌کار بردن قانون‌هایی که در همه‌ی مدارها به‌کار می‌روند و به قانون‌های کیرشهف معروف‌اند، بررسی کرد. این قانون‌ها عبارت‌اند از :

الف ــ قانون شدت جریان‌ها: مجموع جریان‌هایی که به هر گره (یعنی نقطه‌ای که اجزای مدار در آن نقطه به هم متصل شده‌اند) می‌رسند، برابر مجموع جریان‌هایی است که از آن نقطه خارج می‌شوند (این قاعده از اصل پایستگی بار نتیجه می‌شود). در شکل ۳ــ۳۲، $I_۱$ و $I_۲$ به نقطه‌ی A وارد و $I_۳$ از آن نقطه خارج می‌شود یا $I_۳$ به نقطه‌ی B وارد و $I_۱$ و $I_۲$ از آن نقطه خارج می‌شوند. اگر P گره در مدار وجود داشته باشد، این قانون را برای $P-۱$ گره می‌توان نوشت :



شکل ۳ــ۳۲

بنا به قانون شدت جریان‌ها

$$I_۳ = I_۱ + I_۲$$

ب ــ قانون اختلاف پتانسیل‌ها: در هر حلقه یا هر مدار بسته، مجموع جبری اختلاف پتانسیل‌ها صفر است. در به‌کار بردن این قانون باید نکته‌های زیر را رعایت کرد.

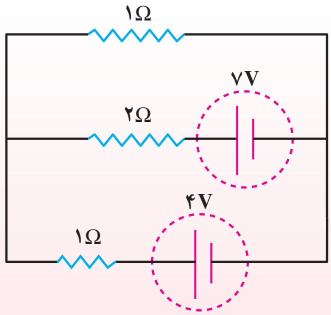
۱ــ همان‌طور که در بخش ۳ــ۶ در مورد مدار تک‌حلقه دیدیم، اگر جهت جریان در مدار مشخص نباشد، جهتی را برای جریان انتخاب می‌کنیم و همان روش را برای حلقه‌ی موردنظر به‌کار می‌بریم.

۲ــ اگر n شاخه در مدار وجود داشته باشد، برای حل مدار به n معادله نیاز داریم و برای نوشتن معادله‌ها به تعداد لازم حلقه درنظر می‌گیریم.

در مثال‌هایی که در ادامه می‌آید، با کاربردهای این قانون‌ها در حل مسئله‌ها آشنا می‌شوید.

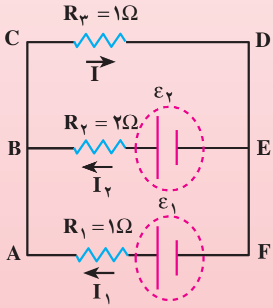
مثال ۳ــ۱۲

در مدار شکل ۳ــ۳۳ شدت جریان را در هر یک از مقاومت‌ها حساب کنید (مقاومت درونی مولّدها ناچیز است).



شکل ۳ــ۳۳

حل: ابتدا برای هر شاخه، جریانی در جهت دلخواه مطابق شکل ۳ــ۳۴ انتخاب می‌کنیم. با توجه به‌تعریف گره ــ همان‌طورکه در شکل ۳ــ۳۴ دیده می‌شود ــ دو گره در این مدار وجود دارد (نقطه‌های B و E).



شکل ۳ــ۳۴

در این‌صورت، بنا به قانون شدت جریان‌ها بین شدت جریان‌ها رابطه‌ای به‌صورت زیر برقرار است.

$$I = I_1 + I_2 \qquad (1)$$

بنا به قانون اختلاف پتانسیل‌ها در حلقه‌ی (مسیر بسته) CDFAC (شامل R_3 و ε_1 و R_1) می‌توان نوشت:

$$-IR_3 + \varepsilon_1 - I_1R_1 = 0 \qquad (2)$$

در حلقه‌ی CDEBC (شامل R_3 و ε_2 و R_2) نیز می‌توان نوشت:

$$-IR_3 + \varepsilon_2 - I_2R_2 = 0 \qquad (3)$$

از سه معادله‌ی ۱ و ۲ و ۳ به‌ترتیب I_1 و I_2 و I را به‌دست می‌آوریم. برای حل کردن این معادله‌ها، در معادله‌های ۲ و ۳ به‌جای I مساوی آن ــ یعنی $I_1 + I_2$ ــ را قرار می‌دهیم. درنتیجه، خواهیم داشت:

$$\begin{cases} -2I_1 - I_2 = 4 \\ -I_1 - 3I_2 = 7 \end{cases}$$

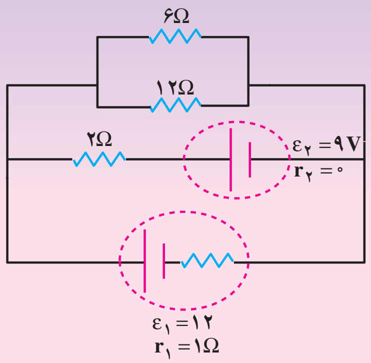
و از آن‌جا نتیجه می‌شود:

$I_2 = 2A$ و $I_1 = 1A$

$I = I_1 + I_2 = 2 + 1 = 3A$

تمرین ۳ــ۹

در مدار شکل ۳ــ۳۵ شدت جریان را در هر شاخه محاسبه کنید.



شکل ۳ــ۳۵

مثال ۳ــ۱۳

در مدار شکل ۳ــ۳۶ شدت جریان در هر شاخه چند آمپر است؟

حل: در حلقه‌ی ۱ بنا به قاعده‌ی اختلاف پتانسیل‌ها می‌توان نوشت:

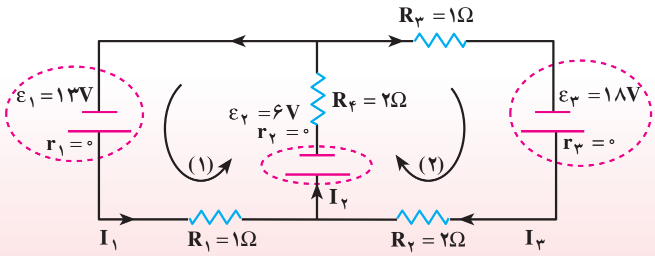
$$-I_1R_1 - \varepsilon_2 - I_2R_4 + \varepsilon_1 = 0$$

در حلقه‌ی ۲ می‌توان نوشت:

$$-I_3R_2 - \varepsilon_2 - I_2R_4 - I_3R_3 + \varepsilon_3 = 0$$

و بنا به قاعده‌ی شدت جریان‌ها

$$I_2 = I_1 + I_3$$



شکل ۳ــ۳۶

یا :

$$\begin{cases}-۱\times I_۱-۶-۲\times I_۲+۱۳=۰\\-۲\times I_۳-۶-۲I_۲-۱\times I_۳+۱۸=۰\end{cases}$$

$$-I_۱-۶-۲(I_۱+I_۳)+۱۳=۰\Rightarrow\ ۳I_۱-۲I_۳+۷=۰$$

$$-۲I_۳-۶-۲(I_۱+I_۳)-I_۳+۱۸=۰\Rightarrow\ ۲I_۱-۵I_۳+۱۲=۰$$

از حل دو معادله‌ی اخیر نتیجه می‌شود :

$I_۳=۲A$ و $I_۲=۳A$ و $I_۱=۱A$

مثال ۳ــ۱۴

شکل ۳ــ۳۷ قسمتی از یک مدار را نشان می‌دهد. V_A-V_B را حساب کنید.

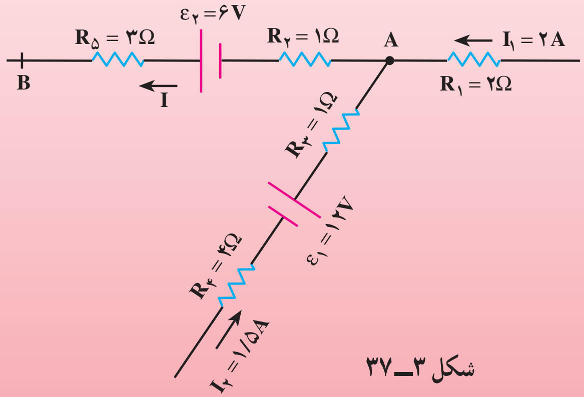
حل: همان‌طورکه در شکل ۳ــ۳۷ دیده می‌شود $I_۱$ و $I_۲$ به نقطه‌ی A نزدیک و I از آن نقطه دور می‌شود بنابراین :

$$I=I_۱+I_۲=۲+۱/۵=۳/۵A$$

از طرفی

$$V_A-IR_۲+\varepsilon_۲-IR_۵=V_B$$

$$V_A-V_B=۳/۵\times۱-۶+۳/۵\times۳=۸V$$



شکل ۳ــ۳۷

تمرین‌های فصل سوم

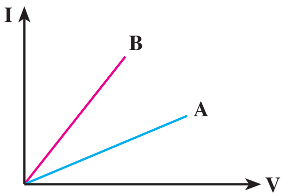
۱ــ شارش بار در هر مقطع رسانا را هنگام اعمال میدان الکتریکی در دو سر رسانا و موقع عدم حضور میدان مقایسه کنید. تغییر دما در هر یک از این وضعیت‌ها چه اثری بر آهنگ شارش بار دارد؟

۲ــ مناسب‌ترین ولت‌سنج برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل در یک مدار چه ویژگی‌ای باید داشته باشد؟ اگر ولت‌سنج مناسب نباشد، آن‌چه اندازه‌گیری می‌شود با اندازه‌ی واقعی چه تفاوتی دارد؟ سؤال بالا را در مورد آمپرسنج مناسب هم بررسی کنید.

۳ــ قانون اهم رابطه‌ی مقاومت را با شدت جریان و ولتاژ بیان می‌کند $R=\frac{V}{I}$. توضیح دهید اگر ولتاژ افزایش یا کاهش یابد مقدار R تغییر می‌کند؟

۴ــ اختلاف پتانسیل دو سر باتری اتومبیل‌های سواری برابر ۱۲ ولت است. اگر ۸ باتری قلمی ۱/۵ولتی را به طور متوالی به یکدیگر وصل کنیم، اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه‌ی آن‌ها نیز برابر ۱۲ ولت می‌شود. توضیح دهید چرا در خودروها به جای باتری خودرو از ۸ باتری قلمی استفاده نمی‌شود.

۵ــ شکل ۳ــ ۳۸ نمودار I-V را برای دو نوع رسانا نشان می‌دهد. مقاومت کدام‌یک بیش‌تر است؟

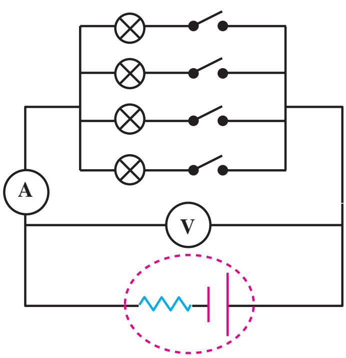


شکل ۳ــ ۳۸

۶ــ نمودار تغییرات ولتاژ دوسر مولد را برحسب شدت جریانی که از آن می‌گذرد به طور کیفی رسم کنید.

۷ــ لامپ‌های یک درخت زینتی، به‌طورمتوالی متصل شده‌اند. اگر یکی از لامپ‌ها بسوزد، چه اتّفاقی می‌افتد؟

۸ــ در شکل ۳ــ ۳۹ تعدادی لامپ مشابه به‌طور موازی به هم متصل شده‌اند و هر لامپ با کلیدی همراه است. بررسی کنید که با بستن کلیدها یکی پس از دیگری، اعدادی که آمپرسنج و ولت‌سنج نشان می‌دهند، چه تغییری می‌کند؟



شکل ۳ــ ۳۹

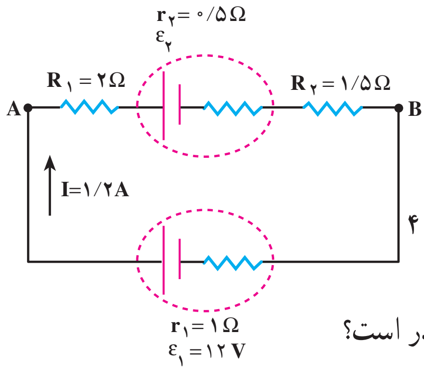
۹ــ دو مقاومت مساوی R را یک‌بار به‌طور متوالی و بار دیگر به‌طور موازی به یک‌دیگر می‌بندیم و آن‌ها را هر بار به ولتاژ V وصل می‌کنیم. نسبت توان مصرف شده در حالت موازی به توان مصرف شده در حالت متوالی چه‌قدر است؟

۱۰ــ سه مقاومت مشابه ۱۲ اُهمی را یک‌بار به‌طور متوالی و بار دیگر به‌طور موازی به یک‌دیگر می‌بندیم و به اختلاف پتانسیل ۱۲ ولت وصل می‌کنیم. در هر بار، چه جریانی از هر مقاومت می‌گذرد؟

۱۱ــ دو مقاومت موازی ۶ اُهمی و ۱۲ اُهمی به‌طور متوالی به یک مقاومت ۲ اُهمی وصل شده است. در این حال، شبکه را به دو سر یک باتری ۳۶ ولتی با مقاومت داخلی ناچیز می‌بندیم. توان مصرفی را در مقاومت ۶ اُهمی محاسبه کنید.

۱۲ــ از مقاومت‌های موازی ۴Ω، ۶Ω و ۱۲Ω جریان کل ۲۱A عبور می‌کند. جریان عبوری از مقاومت ۶Ω چقدر است؟

۱۳ــ در مدار شکل ۳ــ۴۰ شدت جریان در جهت نشان‌داده شده ۱/۲ آمپر است.

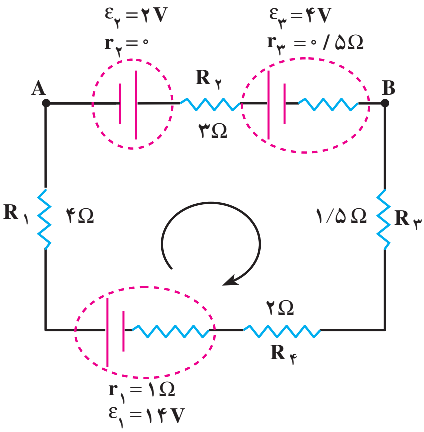


شکل ۳ــ۴۰

الف ــ نیروی محرکه‌ی ε_2 و $V_A - V_B$ چه‌قدر است؟

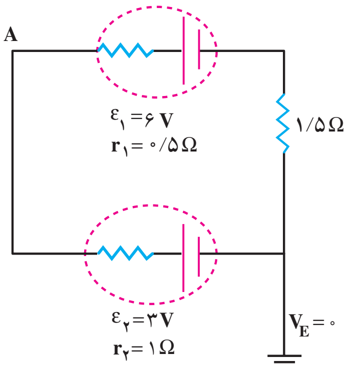
ب ــ انرژی مصرف شده در R_1 و R_2 را در مدت ۵ ثانیه حساب کنید.

۱۴ــ در مدار شکل ۳ــ۴۱، شدت جریان در مدار و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه‌ی A و B را محاسبه کنید.



شکل ۳ــ۴۱

۱۵ــ در شکل ۳ــ۴۲ پتانسیل نقطه‌ی A را محاسبه کنید.

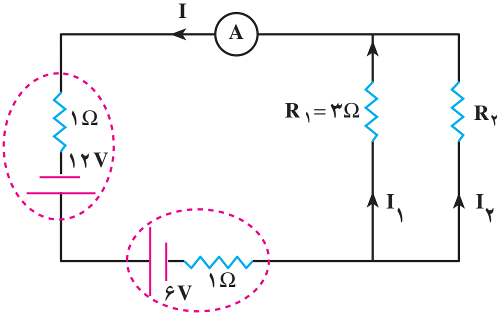


شکل ۳ــ۴۲

۱۶ــ شدت جریانی که آمپرسنج در مدار شکل ۳ــ۴۳ نشان می‌دهد، برابر ۲ آمپر است.

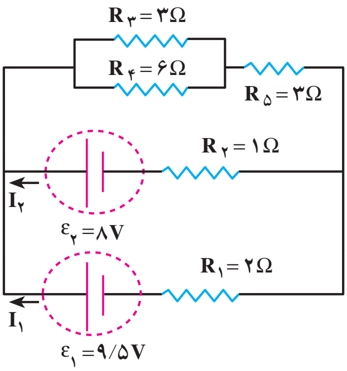
الف ــ مقاومت $R_۲$

ب ــ توان مصرفی هر یک از دو مقاومت را حساب کنید.



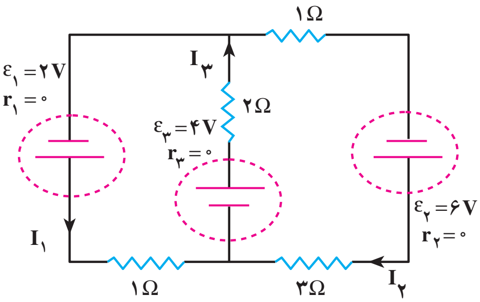
شکل ۳ــ۴۳

۱۷ــ در مدارشکل ۳ــ۴۴، شدت جریان در هر باتری و توان مصرفی کل مقاومت‌های $R_۳$ و $R_۴$ و $R_۵$ را به‌دست آورید.



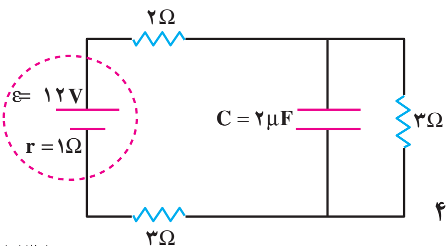
شکل ۳ــ۴۴

۱۸ــ در مدار شکل ۳ــ۴۵جریان $I_۱$ چند آمپر است؟



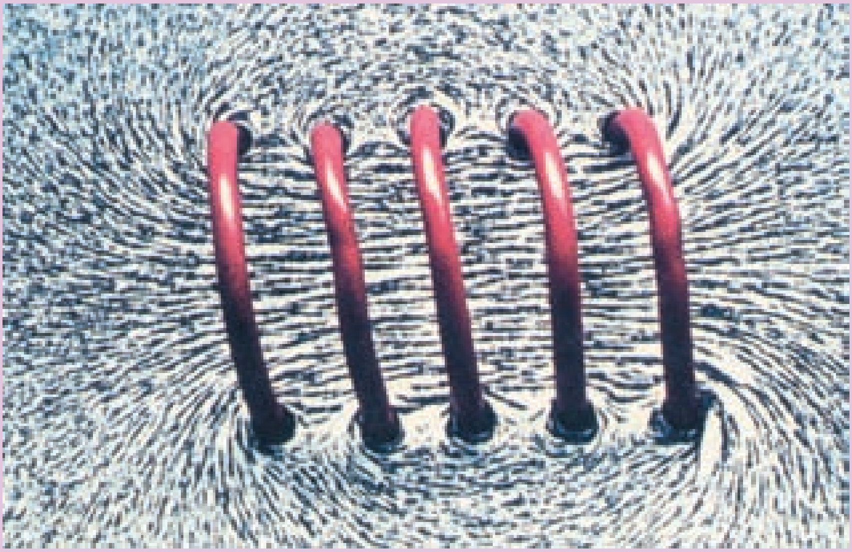
شکل ۳ــ۴۵

۱۹ــ در شکل ۳ــ۴۶، بار الکتریکی وانرژی ذخیره شده در خازن C را محاسبه کنید.



شکل ۳ــ۴۶

۴



می‌دانیم آهنرباهای دائم در فضای اطراف خود میدان مغناطیسی ایجاد می‌کنند. در این فصل خواهیم دید جریان الکتریکی نیز می‌تواند میدان مغناطیسی تولید کند. شکل بالا یک سیملوله‌ی حامل جریان را نشان می‌دهد که در فضای اطراف خود میدان مغناطیسی ایجاد کرده است و این میدان باعث جهت‌گیری براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی شده است.

فصل ۴

مغناطیس

اگر تاکنون با یک اسباب بازی مغناطیسی بازی کرده باشید، یا یک قطب‌نما را به‌کار برده باشید و یا آهنربایی را مثلاً برای نگه‌داشتن یک برگه‌ی کاغذ روی بدنه‌ی یخچال مورد استفاده قرار داده باشید، احتمالاً از مشاهده‌ی پدیده‌های مربوط به شگفت آمده‌اید. آهنرباها برای بسیاری از ما جذابیت خاصی دارند.

آهنربایی را در دست خود نگه دارید و نزدیک یک جسم آهنی یا فولادی بایستید، آیا احساس نمی‌کنید که دست شما به‌طرف آن جسم کشیده می‌شود. در هر یک از دستان خود یک آهنربا نگه‌دارید، حتی وقتی هم که دو آهنربا با هم در تماس نیستند، وجود نیروی مغناطیسی را احساس می‌کنید. اگر یک ماده‌ی غیرمغناطیسی مثل شیشه نیز بین دو آهنربا باشد، باز هم این نیرو وجود دارد. دو آهنربا حتی در خلأ هم به یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. زمین نیز خود یک آهنربای عظیم است، که اثرهای ناشی از آن در پدیده‌های متفاوت دیده می‌شود.



شب هنگام، نور شمالگان (شفق قطبی) در نیم‌کره‌ی شمالی به صورت پرده‌ای نورانی در آسمان دیده می‌شود، ضخامت این پرده‌ی خمیده می‌تواند به ارتفاع چند کیلومتر و به طول چندین هزار کیلومتر باشد.

در این فصل خواهیم دید که جریان‌های الکتریکی نیز اثرهای مغناطیسی دارند. از اثرهای مغناطیسی سیم‌های حامل جریان و مواد مغناطیسی در بسیاری از ماشین‌ها و دستگاه‌هایی که زندگی روزانه‌ی ما را ساده‌تر می‌کنند، استفاده می‌شود.

۴ــ۱ــ آهنربا

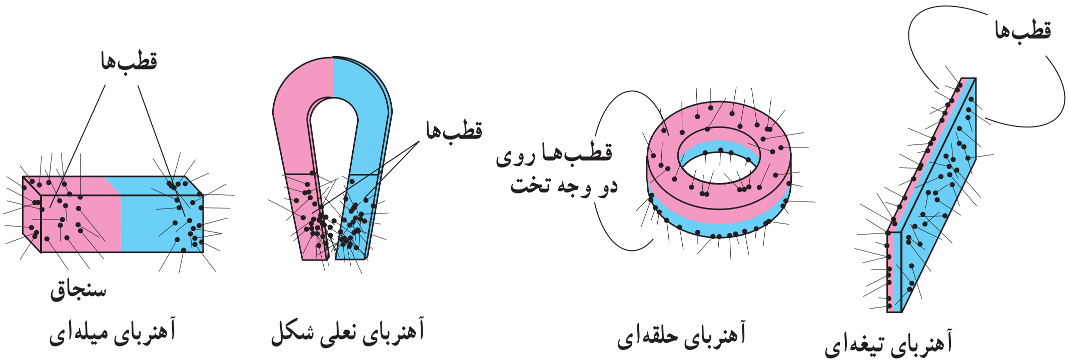
یونانیان باستان، بیش از ۲۵۰۰ سال پیش با پدیده‌ی آهنربایی آشنا بودند. تالس که اغلب از او به‌عنوان پدر علم یونان یاد می‌شود، ماده‌ی کانی مگنتیت (Fe_3O_4) را که آهن را می‌رباید می‌شناخت. همان‌گونه که می‌دانید، ماده‌های دارای این ویژگی را آهنربا می‌نامند. چینی‌های باستان نیز با ویژگی‌های مغناطیسی برخی از سنگ‌های آهنربا آشنایی داشتند و تکه‌هایی از این سنگ‌ها را به‌صورت قطب‌نماهای ساده در دریانوردی به‌کار می‌بردند.

فعالیت ۴ــ۱

در گروه خود آن‌چه را که درباره‌ی آهنرباها و کاربردهای آن‌ها می‌دانید، به‌بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

آهنرباها را با توجه به نوع کاربردی که دارند، به شکل‌های مختلف (میله‌ای، نعلی‌شکل، تیغه‌ای و ...) می‌سازند.

قطب‌های آهنربا: در آهنربا ــ به‌هر شکلی که باشد ــ دو ناحیه وجود دارد که خاصیّت آهنربایی در آن‌ها بیش از قسمت‌های دیگر است. این ناحیه‌ها را قطب‌های آهنربا می‌نامند. قطب‌های آهنرباهای به شکل‌های مختلف را در شکل ۴ــ۱ مشاهده می‌کنید. تجمع سنجاق‌های کوچک مکان قطب‌های آهنربا را نشان می‌دهد.



شکل ۴ــ۱

فعالیت ۴ــ۲

به کمک براده‌های آهن یا چند سنجاق، قطب‌های هریک از آهنرباهایی را که در اختیار دارید، تعیین کنید.

پیش از این دیده‌اید که عقربه‌ی مغناطیسی همواره در جهت معینی می‌ایستد، به‌گونه‌ای که یک قطب معین آن مطابق شکل ۴ــ۲ تقریباً به‌طرف شمال و قطب دیگر آن به‌طرف جنوب قرار می‌گیرد. قطبی را که به‌سوی شمال تمایل دارد (یا به عبارت دیگر شمال‌گرا است) قطب N و قطب جنوب‌گرا را قطب S می‌نامند (شکل ۴ــ۲). قطب‌های همنام آهنرباها یک‌دیگر را می‌رانند و قطب‌های غیرهمنام یک‌دیگر را می‌ربایند.

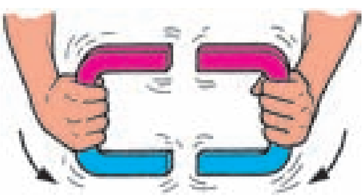


شکل ۴ــ۲ــ قطب‌نماهایی که ملّاحان در دریا و کوهنوردان به هنگام مه غلیظ برای تعیین جهت حرکت به‌کار می‌برند، در واقع یک آهنربای میله‌ای نازک است که بر روی پایه‌ای سوار است و می‌تواند آزادانه بر روی آن بچرخد، و جهت تقریبی شمال را نشان دهد. قطب‌نما را عقربه‌ی مغناطیسی هم می‌نامند.

فعالیت ۴ــ۳

آزمایشی که اثر قطب‌های آهنربا را بر یک‌دیگر نشان دهد طراحی کنید و انجام دهید.

اگر دو آهنربای نعلی‌شکل را مطابق شکل ۴ــ۳ در دو دست خود نگه‌دارید و سعی کنید آن‌ها را طوری به هم نزدیک کنید که قطب‌های همنام به یک‌دیگر نزدیک شوند، به‌خوبی می‌توانید نیروی رانش بین قطب‌های همنام را احساس کنید.



شکل ۴ــ۳

القای خاصیّت مغناطیسی: دیدیم که آهنرباها قطعه‌هایی از جنس آهن را می‌ربایند. علاوه‌بر آهن، ماده‌هایی نظیر نیکل، کبالت و آلیاژهایی که از این سه فلز تشکیل شده‌اند نیز جذب آهنربا می‌شوند. با انجام‌دادن آزمایش ۴ــ۱ درمی‌یابید که قطعه‌ی آهنی ربوده شده توسط آهنربا، خود خاصیت آهنربایی پیدا کرده است.

آزمایش ۴ــ۱

وسیله‌های آزمایش: یک آهنربای میله‌ای، تعدادی میخ آهنی، مقداری براده‌ی آهن (یا سنجاق کوچک).

۱ــ به کمک براده‌های آهن تحقیق کنید که میخ‌ها خاصیت آهنربایی ندارد.

۲ــ آهنربا را مطابق شکل ۴ــ ۴ الف به یک انتهای میخ نزدیک کنید. بار دیگر خاصیّت آهنربایی میخ را به کمک براده‌های آهن تحقیق کنید.

۳ــ مانند شکل ۴ــ ۴ ب میخ‌های دیگری را با استفاده از ربایش مغناطیسی ایجاد شده پشت سر یک‌دیگر قرار دهید و هر بار وجود یا نبود خاصیّت آهنربایی در آخرین میخ را بررسی کنید.

۴ــ آهنربای میله‌ای را از میخ‌ها دور کنید و بار دیگر خاصیت آهنربایی میخ‌ها را بررسی کنید.

الف



ب

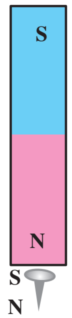


شکل ۴ــ ۴

نتیجه‌ی آزمایش ۴ــ۱ را می‌توانیم به شرح زیر توجیه کنیم :

وقتی که آهنربا در نزدیکی میخ قرار می‌گیرد، در میخ خاصیت مغناطیسی القا می‌شود. اگر قطب N آهنربا را نزدیک به یک سر میخ بیاوریم، مطابق شکل ۴ــ۵ خاصیت آهنربایی طوری القا می‌شود که آن سر، قطب S و سر دورتر قطب N شود. ربایش بین دو قطب غیرهمنام (N در آهنربا و S در میخ) سبب ربوده شدن میخ به سمت آهنربا می‌شود.

این پدیده را **القای خاصیّت مغناطیسی** می‌نامند. همان‌طور که با انجام‌دادن آزمایش ۴ــ۱ نشان داده‌اید، با دور کردن آهنربای اصلی، خاصیّت آهنربایی القا شده نیز ازبین می‌رود. علاوه بر این، خاصیت آهنربایی که دراثر القا در یک قطعه آهن، نیکل یا کبالت ایجاد می‌شود، همواره به‌صورتی است که قطعه‌ی یاد شده جذب آهنربای اصلی می‌شود.



شکل ۴ــ۵

فعالیت ۴ــ۴

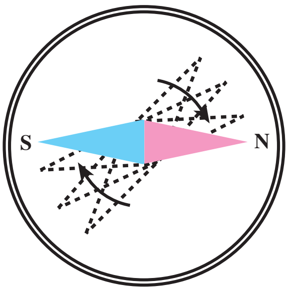
فرض کنید دو میله‌ی کاملاً مشابه یکی از جنس آهن و دیگری آهنربا دراختیار دارید. با بحث در گروه خود، روشی را پیشنهاد کنید که با استفاده از آن بتوانید بدون استفاده از هیچ وسیله‌ی دیگری، میله‌ای را که از جنس آهنرباست مشخص کنید.

۴ــ۲ــ میدان مغناطیسی

در فصل دوم با مفهوم میدان الکتریکی آشنا شدید. در آنجا دیدید که در فضای اطراف هر جسمی که بارالکتریکی دارد خاصیتی ایجاد می‌شود که می‌تواند بر هر جسم باردار دیگری که در آن فضا قرارگیرد نیرو وارد کند. هم‌چنین دیدیم که برای توصیف این خاصیت از یک کمیت برداری به نام میدان الکتریکی با نماد $\vec{E}$ استفاده می‌شود.

در فضای اطراف یک آهنربا نیز خاصیتی وجود دارد که در اثر آن در قطعه‌های آهنی خاصیت آهنربایی القا می‌شود و بر قطب‌های آهنرباهای دیگر نیرویی وارد می‌شود. برای مثال هرگاه یکی از قطب‌های آهنربای میله‌ای را به یک عقربه‌ی مغناطیسی که در راستای تقریبی شمال و جنوب جغرافیایی بر روی پایه‌ای قرار دارد، نزدیک کنیم، می‌بینیم که عقربه‌ی مغناطیسی می‌چرخد (شکل ۴ــ۶).





شکل ۴ــ۶ــ اثر آهنربا بر عقربه‌ی مغناطیسی‌ای که در نزدیکی آن قرار دارد.

در این وضع اگر آهنربا را دور کنیم، عقربه دوباره در راستای تقریبی شمال و جنوب محل قرار می‌گیرد. این آزمایش وجود خاصیّتی را در محیط اطراف یک آهنربا نشان می‌دهد. خاصیّتی را که در اطراف آهنربا ایجاد می‌شود و به‌موجب آن به عقربه‌ی مغناطیسی نیرو وارد می‌شود میدان مغناطیسی می‌نامند. میدان مغناطیسی را با نماد $\vec{B}$ نمایش می‌دهند.

میدان مغناطیسی کمیّتی برداری است و مانند هر کمیّت برداری دیگری دارای جهت و بزرگی است. در ادامه‌ی بحث، نخست جهت این بردار و سپس بزرگی و یکای آن را تعریف می‌کنیم.

جهت میدان مغناطیسی: دیدیم هنگامی که یک عقربه‌ی مغناطیسی را در میدان مغناطیسی یک آهنربا قرار می‌دهیم، عقربه می‌چرخد و در جهت معینی می‌ایستد. اگر آهنربا را در امتداد جدیدی قرار دهیم، عقربه‌ی مغناطیسی نیز خواهد چرخید و در جهت دیگری قرار خواهد گرفت. میدان مغناطیسی در هر نقطه بنا به تعریف هم‌راستای عقربه‌ی مغناطیسی است که در آن نقطه به حال تعادل درآمده باشد و سوی آن از S عقربه به N آن است. به این ترتیب، می‌توانیم بگوییم :

هنگامی که آهنربا در نزدیکی عقربه‌ی مغناطیسی قرار می‌گیرد، عقربه می‌چرخد تا در امتداد میدان‌مغناطیسی آهنربا قرار گیرد و قطب N آن سوی میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد.

خط‌های میدان مغناطیسی: در فصل ۲ دیدیم که میدان الکتریکی را با خط‌های میدان الکتریکی نمایش می‌دهند. میدان مغناطیسی را نیز می‌توان توسط خط‌های میدان مغناطیسی نمایش داد. این خط‌ها طوری رسم می‌شوند که راستای میدان مغناطیسی در هر نقطه مماس بر خط میدان در آن نقطه باشد. خط میدان مغناطیسی در هر نقطه همسو با میدان مغناطیسی در آن نقطه است. علاوه بر این تراکم این خط‌ها در هر ناحیه از فضا نشانگر بزرگی میدان مغناطیسی در آن ناحیه است.

آزمایش ۴ــ۲

وسیله‌های آزمایش: یک آهنربای میله‌ای، یک عقربه‌ی مغناطیسی، مداد و کاغذ.

۱ــ آهنربای میله‌ای را روی کاغذ قرار دهید.

۲ــ عقربه‌ی مغناطیسی را مطابق شکل ۴ــ۷ الف نزدیک قطب N آهنربا قرار دهید و با مداد در نقطه‌ای که قطب N عقربه به آن سمت ایستاده یک نقطه بگذارید.

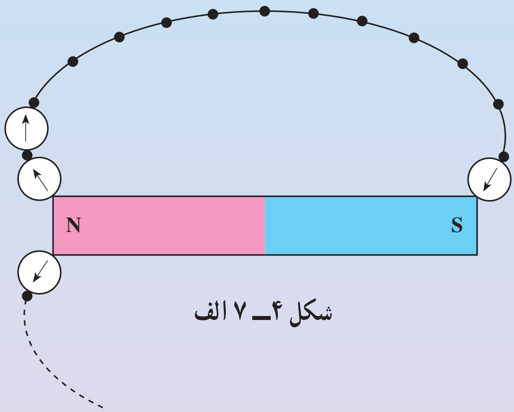
۳ــ عقربه را جابه‌جا کنید به‌طوری که قطب S آن روی نقطه‌ای که علامت

زده‌اید قرار گیرد. بار دیگر با مداد در مکان قطب N عقربه نقطه‌ای بگذارید.

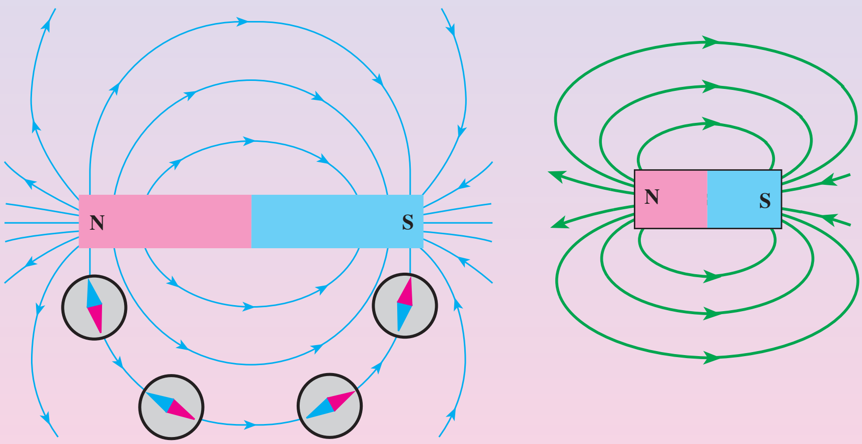
۴ـ این کار را آن‌قدر ادامه دهید تا بار دیگر عقربه به آهنربای میله‌ای برسد.

۵ـ این نقطه‌ها را به هم وصل کنید. روی منحنی حاصل، جهتی را که قطب N عقربه در آن می‌ایستد، با رسم پیکان مشخص کنید.

۶ ـ مرحله‌های ۲ تا ۴ را چند بار تکرار کنید. هر بار از نقطه‌ای نزدیک نقطه‌ی شروع قبلی آغاز کنید تا آنکه شکلی مانند شکل ۴ــ ۷ ب به‌دست آورید.



شکل ۴ــ ۷ الف



شکل ۴ــ ۷ ب

با استفاده از مقداری براده‌ی آهن می‌توان طرحی از خط‌های میدان مغناطیسی یک آهنربا تهیه کرد. برای این کار آزمایش ۴ــ۳ را انجام دهید.

آزمایش ۴ـ۳

وسیله‌های آزمایش: آهنربای میله‌ای، آهنربای نعلی‌شکل، براده‌ی آهن، یک صفحه‌ی شیشه‌ای یا مقوایی، یک نمک‌پاش (یا وسیله‌ی دیگری برای پاشیدن براده‌ی آهن).

۱ــ آهنربای میله‌ای را روی میز قرار دهید و صفحه‌ی شیشه‌ای (یا مقوایی) را روی آن بگذارید.

۲ــ به کمک نمک‌پاش براده‌های آهن را به‌طور یکنواخت به‌ضخامت خیلی کم روی شیشه بپاشید.

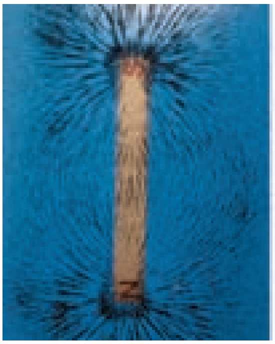
۳ــ چند ضربه‌ی آرام به صفحه‌ی شیشه‌ای بزنید تا براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی قرار گیرند. طرحی که روی صفحه‌ی شیشه‌ای پدیدار می‌شود، نقشه‌ای از خط‌های میدان مغناطیسی یک آهنربای میله‌ای است.

پرسش ۴ـ۱

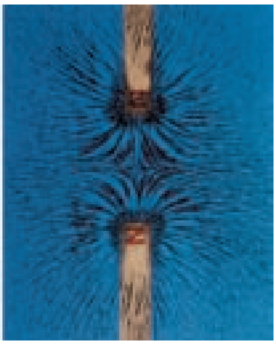
با استفاده از خاصیت القای مغناطیسی، توضیح دهید که چرا براده‌های آهن در آزمایش ۴ــ۳ در راستای خط‌های میدان مغناطیسی می‌ایستند.

میدان مغناطیسی یکنواخت: اگر خط‌های میدان مغناطیسی در ناحیه‌ای از فضا با یک‌دیگر موازی و هم‌فاصله باشند، بردار میدان مغناطیسی در همه‌ی نقطه‌های آن ناحیه، بزرگی و جهت ثابتی دارد. یک چنین میدان مغناطیسی‌ای را میدان مغناطیسی یکنواخت می‌نامند.

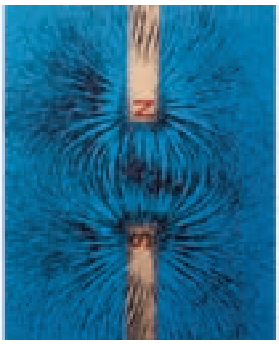
خط‌های میدان مغناطیسی مربوط به آهنرباها را که در وضعیت‌های مختلف به کمک براده‌های آهن به‌دست آمده است، در شکل ۴ــ ۸ مشاهده می‌کنید.



(الف) آهنربای میله‌ای



(ب) دو آهنربای میله‌ای که قطب‌های همنامشان نزدیک یک‌دیگر است.



(پ) دو آهنربای میله‌ای که قطب‌های غیرهمنامشان نزدیک یک‌دیگر است.

شکل ۴ــ۸ــ خط‌های میدان مغناطیسی آهنرباها در وضعیت‌های مختلف

۴ــ۳ــ تعریف میدان مغناطیسی با استفاده از نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی

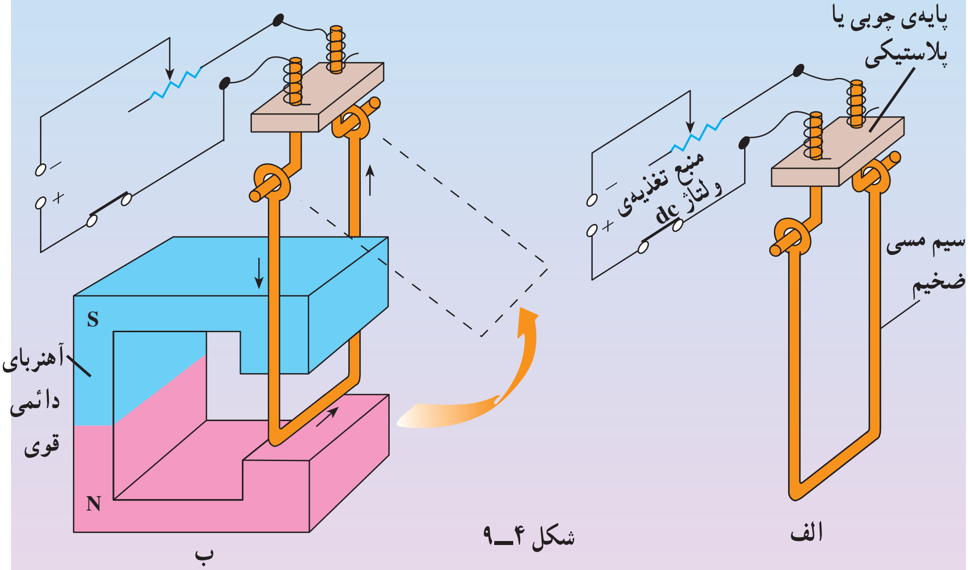
دیدیم که هرگاه یک عقربه‌ی مغناطیسی یا هر آهنربای دیگری در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، بر آن نیرو وارد می‌شود. در ادامه خواهیم دید که بر سیم‌های حامل جریان الکتریکی نیز در میدان مغناطیسی نیرو وارد می‌شود، بزرگی میدان مغناطیسی و یکای آن را می‌توان با استفاده از این اثر تعریف کرد. برای مشاهده‌ی این نیرو آزمایش زیر را انجام دهید.

آزمایش ۴ــ۴

وسیله‌های آزمایش: یک آهنربای نعلی‌شکل قوی، سیم مسی ضخیم، سیم رابط، رئوستا و منبع تغذیه.

۱ــ مداری مطابق شکل ۴ــ۹ الف ببندید.

۲ــ آهنربای نعلی‌شکل را مطابق شکل ۴ــ۹ ب در اطراف سیم مسی قرار دهید.



شکل ۴ــ۹

۳ــ کلید را ببندید تا جریان از سیم مسی بگذرد. آنچه را که مشاهده می‌کنید، بنویسید.

۴ــ این آزمایش را چند بار تکرار کنید و هر بار آهنربا را در وضعیّت جدیدی در اطراف سیم‌مسی قرار دهید و با بستن کلید مشاهده‌های خود را یادداشت کنید.

۵ــ نتیجه‌ی آزمایش را به کلاس گزارش دهید.

۶ــ این آزمایش را با یک آهنربای دیگر تکرار کنید.

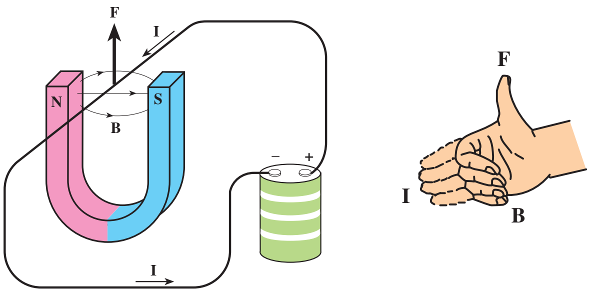
۷ــ جهت و بزرگی شدت جریان را تغییر دهید و آزمایش‌های بالا را تکرار کنید.

اورستد (فیزیکدان دانمارکی) با انجام آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۴ــ۴ و اندازه‌گیری دقیق نیرویی که بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی وارد می‌شود، نشان داد که :

نیرویی که در میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود، بر راستای جریان و نیز بر میدان مغناطیسی عمود است.

جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی را می‌توان از قاعده‌ای به نام قاعده‌ی دست راست به این صورت پیش‌بینی کرد :

اگر دست راست خود را باز نگه دارید و چهار انگشت را مطابق شکل ۴ــ۱۰ در جهت جریان بگیرید به‌طوری که اگر انگشتان خود را خم کنید، در جهت میدان مغناطیسی قرار گیرد ــ دراین‌صورت، انگشت شست شما جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان را نشان خواهد داد.



شکل ۴ــ۱۰ــ قاعده‌ی دست راست برای تعیین جهت نیروی $\vec{F}$ وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی I درمیدان مغناطیسی $\vec{B}$

عامل‌های مؤثر بر نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی: بزرگی نیروی $\vec{F}$ که در میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود، به عامل‌های زیر بستگی دارد :

۱ــ *جریانی که از سیم می‌گذرد (I)* ؛ هرچه جریان بیش‌تر باشد، نیروی وارد بر سیم از سوی میدان مغناطیسی بیش‌تر خواهد بود.

$F \propto I$

۲ــ *طول قسمتی از سیم که در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد (l)* ؛ هرچه طول بیش‌تری از سیم در میدان قرار گیرد، نیروی وارد بر آن بزرگ‌تر خواهد بود.

$F \propto l$

۳ــ *میدان مغناطیسی* ($\vec{B}$) ؛ نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان‌های مغناطیسی مختلف یکسان نیست. نیرویی که در میدان مغناطیسی یک آهنربای قوی‌تر بر سیم حامل جریان وارد می‌شود، بزرگ‌تر است. با استفاده از این واقعیت، می‌توانیم بزرگی میدان مغناطیسی را تعریف کنیم. اندازه‌ی میدان مغناطیسی را با B نمایش می‌دهند :

$$F \propto B$$

۴ــ *سینوس زاویه‌ای که جریان با میدان مغناطیسی می‌سازد* ($\sin\alpha$) ؛ نیروی وارد بر سیم حامل جریان در یک میدان مغناطیسی با سینوس زاویه‌ی بین راستای میدان و راستای جریان متناسب است.

$$F \propto \sin\alpha$$

تناسب‌های بالا را می‌توان با استفاده از ضریب تناسب k، به‌صورت زیر خلاصه کرد.

$$F = kBlI\sin\alpha \qquad (۴ــ۱)$$

با انتخاب یکای مناسب برای میدان مغناطیسی، می‌توان ضریب تناسب k را برابر یک گرفت. در نتیجه داریم

$$F = BlI\sin\alpha \qquad (۴ــ۲)$$

اگرجریان I و میدان B بر هم عمود باشند، داریم :

$$\sin\alpha = ۱$$

در نتیجه، نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی عمود بر آن به‌قرار زیر است :

$$F = BlI \qquad (۴ــ۳)$$

این بیش‌ترین نیرویی است که میدان مغناطیسی B می‌تواند بر طول l از سیم حامل جریان I وارد کند. بنابراین، می‌توانیم اندازه‌ی میدان مغناطیسی B را با رابطه‌ی زیر تعریف کنیم.

$$B = \frac{F_{\text{بیشینه}}}{Il} \qquad (۴ــ۴)$$

یعنی بزرگی میدان مغناطیسی در هر نقطه، برابر است با نیرویی که بر یک متر از طول سیم حامل جریانی به شدت یک آمپر که در راستای عمود بر میدان قرار گرفته باشد وارد می‌شود.

یکای میدان مغناطیسی، تسلا: رابطه‌ی ۴ــ۴ را برای تعریف یکای میدان مغناطیسی به‌کار می‌بریم. یکای میدان مغناطیسی در SI تسلا نام دارد و با نماد T نشان داده می‌شود.

بنا به تعریف، **یک تسلا بزرگی میدان مغناطیسی است که در آن بر یک متر از سیمی که حامل جریان الکتریکی به شدت یک آمپر است و در راستای عمود بر میدان قرار دارد نیرویی به بزرگی یک نیوتون وارد شود.** در نتیجه، می‌توانیم بنویسیم :

$$\text{۱ تسلا} = \frac{\text{۱ نیوتون}}{(\text{۱ آمپر}) \times (\text{۱ متر})}$$

تسلا یکای بزرگی است. در کاربردهای عملی از یکای کوچکتری استفاده می‌کنند که **گاؤس** نام دارد و با نماد G نمایش داده می‌شود.

$$1T = 10^{4} G$$

مثال ۴ـ۱

یک سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی به بزرگی $0/04 mT$ در راستایی که با جهت میدان زاویه‌ی 30° می‌سازد، قرار دارد. اگر شدت جریانی که از سیم می‌گذرد ۵ آمپر باشد، نیروی مغناطیسی وارد بر یک متر از این سیم را محاسبه کنید.

حل: بزرگی نیروی مغناطیسی برابر است با :

$$F = IlB\sin\alpha$$

$$F = 5\times 1\times 4\times 10^{-5}\sin 30^\circ$$

$$F = 10\times 10^{-5} N = 0/1 mN$$

تمرین ۴ـ۱

سیم افقی مستقیم حامل جریانی در یک میدان مغناطیسی یکنواخت افقی که جهت آن از شمال به جنوب است، قرار دارد. جهت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم را تعیین کنید ؛ (الف) اگر سیم در راستای شمال ــ جنوب و جریان آن از شمال به جنوب باشد. (ب) اگر سیم در راستای شرق ــ غرب و جریان آن از غرب به شرق باشد.

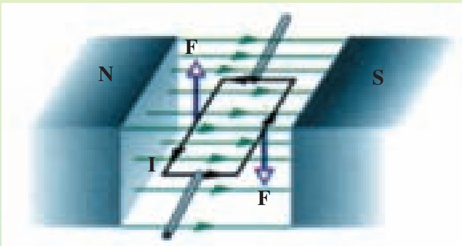
فعالیت ۴ـ۵

آزمایشی را طراحی کنید که به کمک آن بتوان نیروی وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی را اندازه‌گیری کرد.

فنّاوری

طرز کار گالوانومتر: گالوانومتر وسیله‌ای است که با آن جریان‌های الکتریکی بسیار کوچک را اندازه می‌گیرند. امروزه وسیله‌های اندازه‌گیری کمیت‌های الکتریکی (یعنی شدت جریان، اختلاف پتانسیل، مقاومت و ...) معمولاً عقربه‌ای یا رقمی (دیجیتالی) هستند. تشریح سازوکار وسیله‌های رقمی به مطالب موجود در این کتاب مربوط نمی‌شود. ولی با استفاده از مطالبی که فراگرفته‌ایم، می‌توانیم سازوکار گالوانومتر عقربه‌ای را مورد بررسی قرار دهیم. برای این کار، ابتدا ببینیم اگر یک سیم حامل جریان به شکل یک قاب مطابق شکل ۴ــ۱۱ در یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار گیرد، چه نیروهایی بر آن وارد می‌شود. چنین سیمی را یک پیچه می‌نامند.

محور پیچه



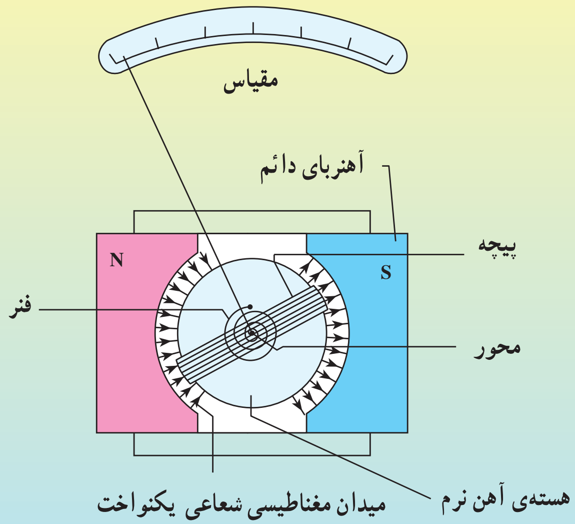
شکل ۴ــ ۱۱ــ پیچه‌ی حامل جریان در میدان مغناطیسی

هنگامی که جریان از پیچه می‌گذرد، از طرف میدان بر اضلاع آن نیرو وارد می‌شود و در نتیجه پیچه مطابق شکل ۴ــ۱۱ حول محورش می‌چرخد.

هر گالوانومتر دارای یک قاب است که به دور آن سیم پیچیده شده است، این قاب در یک میدان مغناطیسی دائم و قوی قرار گرفته است. وقتی جریان از این پیچه می‌گذرد، از سوی میدان مغناطیسی به قاب نیرو وارد می‌شود و آن را می‌چرخاند (شکل ۴ــ۱۲ را ببینید) و عقربه‌ی متصل به قاب را منحرف می‌کند. هرقدر اندازه‌ی شدت جریان بیش‌تر باشد، میزان چرخش پیچه و انحراف عقربه بیش‌تر خواهد شد.

اگر جریانی در جهت وارون شارش کند، جهت چرخش پیچه و انحراف وارون خواهد شد. با قطع جریان، فنر ظریفی که در پشت پیچه قرار دارد، پیچه و عقربه را به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گرداند. صفحه‌ی گالوانومتر که عقربه در مقابل آن می‌چرخد را بر حسب آمپر مدرج می‌کنند، به این ترتیب که در مقابل هر زاویه، بزرگی شدت

جریانی که عقربه را به اندازه‌ی آن زاویه منحرف می‌کند، ثبت می‌کنند.



شکل ۴ــ۱۲

فنّاوری

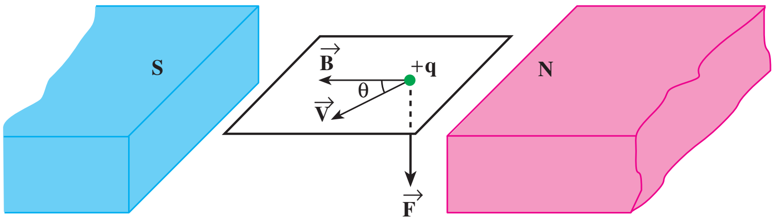
موتور الکتریکی: موتورهای الکتریکی ابزارهایی هستند که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. این موتورها در انجام کارهای مختلف روزانه مورد استفاده قرار می‌گیرند، و اساس کار بسیاری از دستگاه‌ها نظیر جاروی‌برقی، مته‌ی برقی، آسیاب برقی، ماشین لباس‌شویی، پنکه و ... را تشکیل می‌دهند.

ساختمان موتور الکتریکی مانند ساختمان گالوانومتر است، از این‌نظر که در موتور الکتریکی نیز عبور جریان از یک قاب (به نام روتور) واقع در میدان مغناطیسی، باعث چرخش پیچه می‌شود. چرخش قطعات در دستگاه‌های بالا از این حرکت پیچه ناشی می‌شود.

۴ـ۴ـ نیروی وارد بر ذره‌ی باردار متحرک در میدان مغناطیسی

در بخش گذشته دیدیم که در میدان مغناطیسی، نیرویی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود. هرگاه جریان صفر شود، نیروی وارد بر سیم نیز صفر می‌شود. در فصل ۳ دیدیم که جریان الکتریکی درواقع شارش بارهای الکتریکی است و صفر شدن جریان در یک رسانا به‌طور متوسط به معنای توقف شارش بارهای الکتریکی است. پس نتیجه می‌گیریم که نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی، درواقع بر بارهایی وارد می‌شود که در سیم درحال حرکت‌اند.

آزمایش نشان می‌دهد که اگر ذره‌ی باردار q با سرعت $\vec{v}$ در میدان مغناطیسی $\vec{B}$ حرکت کند (به‌شرط آن‌که جهت حرکت آن موازی با میدان نباشد) بر آن نیرویی وارد خواهد شد که مطابق شکل ۴ـ۱۳ بر راستای $\vec{v}$ و میدان مغناطیسی $\vec{B}$ عمود است. این نیرو را **نیروی الکترومغناطیسی** می‌نامند.



شکل ۴ـ۱۳ـ ذره‌ی با بار مثبت q که در میدان مغناطیسی $\vec{B}$ با سرعت $\vec{v}$ حرکت می‌کند.

آزمایش نشان می‌دهد که بزرگی نیرویی که در میدان مغناطیسی بر بار الکتریکی q که با سرعت $\vec{v}$ در حرکت است وارد می‌شود، به عامل‌های زیر بستگی دارد.

۱ـ بار الکتریکی (q)؛ هرچه بار الکتریکی q بزرگ‌تر باشد، نیروی وارد بر آن از سوی میدان مغناطیسی بزرگ‌تر خواهد بود.

$$F \propto q$$

۲ـ سرعت حرکت بار الکتریکی ($\vec{v}$)؛ هرچه سرعت حرکت بار الکتریکی در میدان مغناطیسی بیش‌تر باشد، نیرویی که از سوی میدان مغناطیسی بر آن وارد می‌شود، بزرگ‌تر خواهد بود.

$$F \propto v$$

۳ـ میدان مغناطیسی ($\vec{B}$)؛ هرچه میدان مغناطیسی قوی‌تر باشد، نیرویی که بر بار وارد

می‌شود، بیش‌تر خواهد بود.

$$F \propto B$$

۴ــ سینوس زاویه‌ی θ که جهت حرکت بار الکتریکی (یعنی بردار $\vec{v}$) با میدان مغناطیسی می‌سازد؛ نیروی وارد بر بار الکتریکی متحرک در میدان مغناطیسی با سینوس این زاویه متناسب است (شکل ۴ــ۱۳).

$$F \propto \sin\theta$$

تناسب‌های بالا را می‌توان در رابطه‌ی زیر خلاصه کرد.

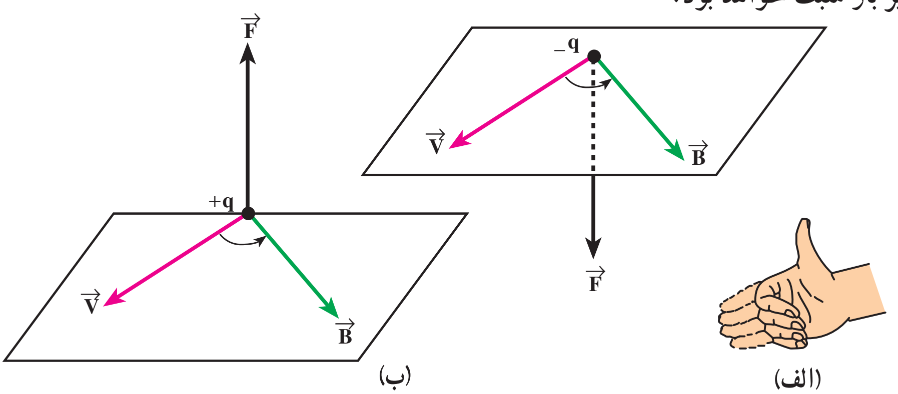
$$F = kq\,vB\sin\theta \qquad (۴ــ۵)$$

که در آن k ضریب تناسب است. اگر F برحسب نیوتون و q برحسب کولن و v برحسب m/s و B برحسب تسلا باشد، ضریب تناسب یک خواهد شد. در نتیجه، داریم :

$$F = qvB\sin\theta \qquad (۴ــ۶)$$

جهت نیروی وارد بر بار متحرک: سوی نیروی مغناطیسی وارد بر بارالکتریکی مثبت که در میدان مغناطیسی $\vec{B}$ با سرعت $\vec{v}$ حرکت می‌کند نیز توسط قاعده‌ی دست راست به ترتیب زیر تعیین می‌شود.

اگر دست راست خود را طوری نگه داریم که انگشتان باز شده‌ی ما در راستای $\vec{v}$ (یعنی درجهت حرکت بارالکتریکی) باشد ــ به‌گونه‌ای که وقتی آن‌ها را روی زاویه‌ی کوچک‌تری که $\vec{v}$ با $\vec{B}$ می‌سازد مطابق شکل ۴ــ۱۴ الف خم کنیم در جهت B قرار گیرد ــ انگشت شست ما در جهت نیروی وارد بر بار خواهد بود. نیروی وارد بر بار منفی مانند شکل ۴ــ ۱۴ ب در خلاف جهت نیروی وارد بر بار مثبت خواهد بود.



شکل ۴ــ ۱۴ــ (الف) قاعده‌ی دست راست برای تعیین جهت نیروی وارد بر بار متحرک در میدان مغناطیسی، (ب) جهت نیروی وارد بر بار الکتریکی متحرک مثبت و منفی، در میدان مغناطیسی

پرسش ۴ـ۲

اگر بار الکتریکی موازی با $\vec{B}$ حرکت کند، نیروی مغناطیسی وارد بر آن چه‌قدر است؟

مثال ۴ـ۲

ذره‌ای با بار ۴ میکروکولن و با سرعت ۲×۱۰^{۳} m/s در راستایی که با میدان مغناطیسی یکنواخت ۱۰۰G زاویه‌ی ۳۰° می‌سازد، در حرکت است. بزرگی نیروی وارد بر این ذره را محاسبه کنید.

حل: نیروی وارد بر بارمتحرک در میدان مغناطیسی از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$F = qvB\sin\theta$$
$$= ۴\times۱۰^{-۶}\times۲\times۱۰^{۳}\times۱۰^{-۲}\sin ۳۰^\circ$$
$$= ۴\times۱۰^{-۵}N$$

۴ـــ ۵ــ آثار مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی

اورستد ضمن انجام دادن برخی آزمایش‌های الکتریسیته برای جمعی از دانشجویان خود، مشاهده کرد که عقربه‌ی مغناطیسی موجود در کنار سیم حامل جریان الکتریکی منحرف می‌شود. او با انجام دادن آزمایش‌های بیش‌تر کشف کرد که عبور جریان الکتریکی از یک سیم، در اطراف آن یک میدان مغناطیسی به‌وجود می‌آورد. این کشف اورستد نخستین گام در راه درک رابطه‌ی بین الکتریسیته و مغناطیس بود که به گسترش مبحث الکترومغناطیس انجامید. در این بخش، به بررسی میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در سیم‌ها می‌پردازیم.

آزمایش ۴ـ۵ (آزمایش اورستد)

وسیله‌های آزمایش: منبع تغذیه، سیم مسی نسبتاً ضخیم، رئوستا، آمپرسنج، صفحه‌ی مقوایی، عقربه‌ی مغناطیسی، کلید قطع و وصل و سیم رابط.

۱ــ سیم مسی را از صفحه‌ی مقوایی عبور دهید و با آن مداری مطابق شکل ۴ــ۱۵ ترتیب دهید.

۲ــ قبل از بستن کلید و برقراری جریان الکتریکی، عقربه‌ی مغناطیسی را درمجاورت سیم، روی مقوا قرار دهید و به راستای قرارگرفتن آن توجه کنید.

۳ــ با وصل کردن کلید و تنظیم رئوستا، جریان مناسبی را از مدار عبور دهید. آنگاه به سمت‌گیری عقربه‌ی مغناطیسی توجه کنید.

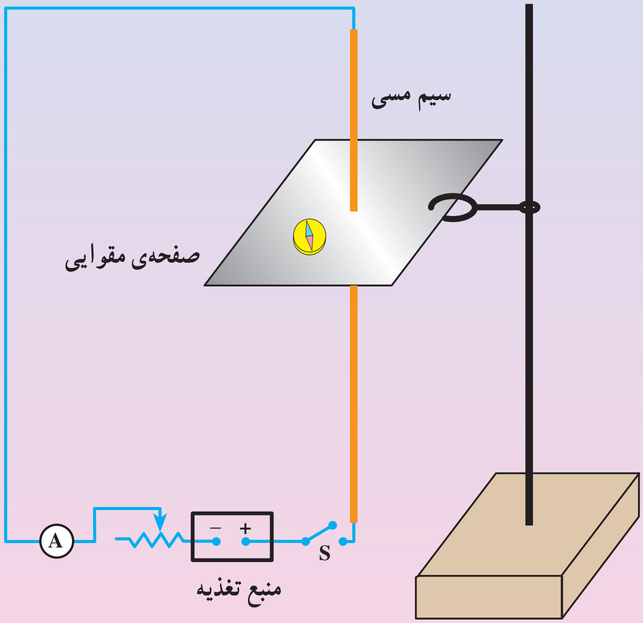
۴ــ عقربه‌ی مغناطیسی را در نقطه‌های مختلف روی مقوا قرار دهید و سمت‌گیری آن را بررسی کنید.

۵ ــ چند خط میدان مغناطیسی را به روش آزمایش ۴ــ۲ رسم کنید.

۶ــ نتیجه‌ی این آزمایش را در گروه خود بحث کنید و به کلاس گزارش دهید.

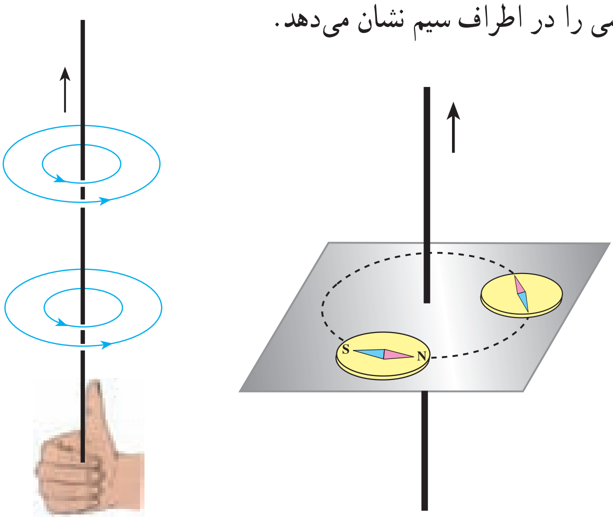
۷ــ این آزمایش را بار دیگر با جریانی در جهت مخالف تکرار کنید.

۸ ــ تحقیق کنید که افزایش شدت جریان چه تأثیری در نتیجه‌ی آزمایش دارد؟



شکل ۴ــ۱۵

با انجام دادن این آزمایش می‌بینید که خط‌های میدان مغناطیسی حاصل از یک سیم حامل جریان، مطابق شکل ۴ــ۱۶ الف به‌صورت دایره‌های هم‌مرکزی در اطراف سیم حامل جریان خواهند بود. جهت خط‌های میدان مغناطیسی سیم حامل جریان را می‌توان به کمک عقربه‌ی مغناطیسی تعیین کرد. علاوه بر آن با استفاده از قاعده‌ی دست راست نیز می‌شود این جهت را تعیین کرد؛ بنابراین قاعده، اگر سیم را مطابق شکل ۴ــ۱۶ ب در دست راست خود بگیرید ــ به گونه‌ای که انگشت شست در جهت جریان الکتریکی باشد ــ جهت خم‌شدن چهار انگشت دست شما جهت خط‌های میدان مغناطیسی را در اطراف سیم نشان می‌دهد.



(ب) (الف)

شکل ۴ــ۱۶

آزمایش نشان می‌دهد که بزرگی میدان مغناطیسی B در اطراف یک سیم نازک دراز مستقیم حامل جریان الکتریکی‌ای به شدت I در نقطه‌ای که فاصله‌ی عمودی آن از سیم برابر R است با I نسبت مستقیم و با R نسبت وارون دارد، یعنی

$$B \propto \frac{I}{R}$$

ضریب تناسب در SI برابر $\frac{\mu_\circ}{۲\pi}$ است که در آن $\mu_\circ$ تراوایی مغناطیسی خلأ نام دارد و برابر است با $\mu_\circ = ۴\pi \times ۱۰^{-۷} \frac{Tm}{A}$. در نتیجه، داریم:

$$B = \frac{\mu_\circ I}{۲\pi R} \qquad (۴ــ۷)$$

مثال ۴ـ۳

بزرگی میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی‌ای به شدت ۲ آمپر را که از سیمی نازک، دراز و مستقیم می‌گذرد، در نقطه‌ای به فاصله‌ی الف) ۲ متر، ب) ۲ میلی‌متر از سیم حساب کنید.

حل: داریم

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

الف)

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2}{2\pi \times 2} = 2 \times 10^{-7}\,T$$

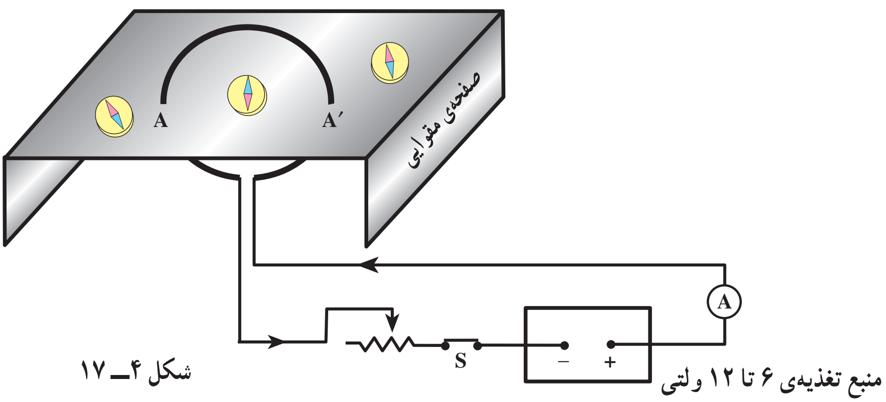
ب)

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2}{2\pi \times 2 \times 10^{-3}} = 2 \times 10^{-4}\,T$$

میدان مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی در یک پیچه‌ی مسطح: پیچه‌ی مسطح از چند دور سیم نازک به شکل حلقه تشکیل شده که به هم فشرده شده‌اند و به‌صورت یک حلقه‌ی مسطح درآمده‌اند. خطی که از مرکز این حلقه می‌گذرد و عمود بر سطح آن است، محور پیچه نامیده می‌شود. پیچه‌ها در بسیاری از وسیله‌های برقی برای ایجاد میدان مغناطیسی به‌کار می‌روند.

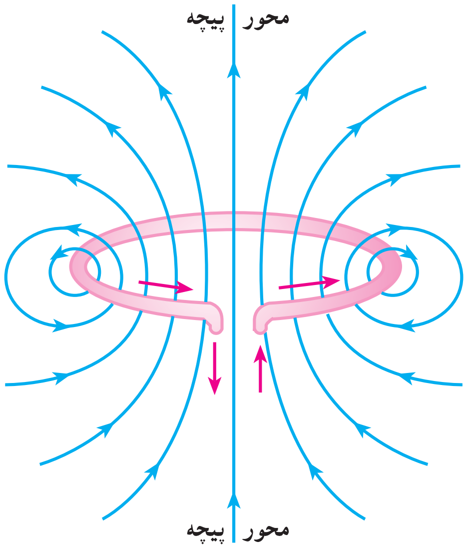
فعالیت ۴ـ۶

با استفاده از عقربه‌ی مغناطیسی و براده‌ی آهن خط‌های میدان مغناطیسی ناشی از عبور جریان الکتریکی از یک پیچه را تعیین کنید. برای این کار، می‌توانید از مداری مطابق شکل ۴ـ ۱۷ استفاده کنید.



شکل ۴ـ ۱۷

خط‌های میدان مغناطیسی پیچه روی صفحه‌ای که از محور پیچه می‌گذرد، در شکل ۴ــ ۱۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، خط‌های میدان در ناحیه‌ی داخل پیچه به یک‌دیگر نزدیک‌ترند ؛ یعنی، میدان در این ناحیه قوی‌تر است.



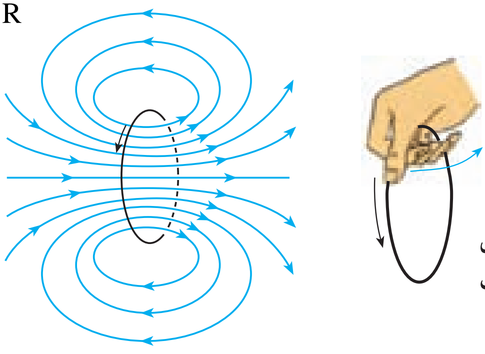
شکل ۴ــ ۱۸ــ نقشه‌ی خط‌های میدان مغناطیسی در صفحه‌ی عمود بر سطح پیچه که از محور پیچه می‌گذرد.

هم‌چنین در شکل ۴ــ۱۸ دیده می‌شود که در نقطه‌هایی که بر محور پیچه قرار دارند، میدان موازی با محور پیچه است.

جهت میدان مغناطیسی پیچه را در هر نقطه می‌توان با قاعده‌ی دست راست ــ به روشی که قبلاً توضیح داده شد ــ تعیین کرد (شکل ۴ــ۱۹).

بزرگی میدان مغناطیسی پیچه‌ی مسطحی به شعاع R که N دور دارد و جریان الکتریکی‌ای به شدت I آمپر از آن می‌گذرد، در **مرکز پیچه** از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$B = \frac{\mu_\circ NI}{۲R} \qquad (۴ــ۸)$$



شکل ۴ــ۱۹ــ استفاده از قاعده‌ی دست راست برای تعیین جهت میدان مغناطیسی پیچه

مثال ۴ـ۴

از پیچه‌ی مسطحی به شعاع ۶/۲۸cm که از ۱۰۰ دور سیم نازک درست شده است جریانی به شدت ۲ آمپر می‌گذرد. میدان مغناطیسی را در مرکز پیچه به‌دست آورید.

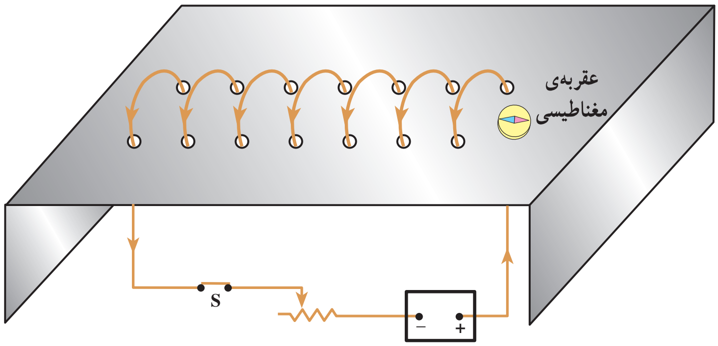
حل: داریم

$$B=\frac{\mu_\circ NI}{۲R}=\frac{۴\pi\times ۱۰^{-۷}\times ۱۰۰\times ۲}{۲\times ۶/۲۸\times ۱۰^{-۲}}=۲\times ۱۰^{-۳}T$$

میدان مغناطیسی حاصل از سیملوله‌ی حامل جریان: سیملوله از چند دور سیم تشکیل شده است که شبیه به یک فنر پیچیده شده است. اگر جریان الکتریکی‌ای از سیملوله عبور کند، در فضای اطراف سیملوله خاصیت مغناطیسی ایجاد می‌شود. با انجام فعالیت زیر به‌وجود میدان مغناطیسی در اطراف سیملوله‌ی حامل جریان پی می‌برید.

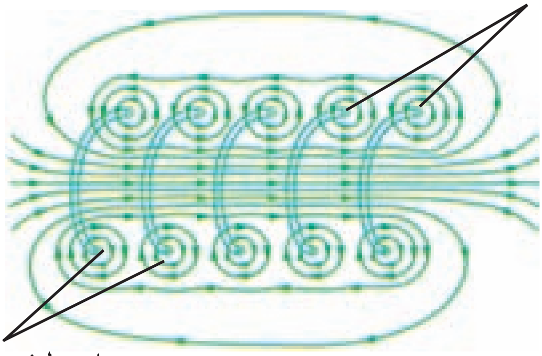
فعالیت ۴ـ۷

روی یک جعبه‌ی مقوایی یا پلاستیکی دو ردیف سوراخ با فاصله‌های مساوی ایجاد کنید. سیم را به‌صورتی که در شکل ۴ـ۲۰ نشان داده شده است از میان سوراخ‌ها عبور دهید تا یک سیملوله درست شود. جریان الکتریکی ثابتی از سیملوله عبور دهید و با استفاده از عقربه‌ی مغناطیسی یا براده‌های آهن، خط‌های میدان مغناطیسی سیملوله را مشخص کنید.



شکل ۴ـ۲۰

نقش خط‌های میدان مغناطیسی یک سیملوله‌ی حامل جریان الکتریکی در داخل و خارج آن در شکل ۴ــ۲۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل می‌بینید، خط‌های میدان داخل سیملوله بسیار متراکم‌تر از خط‌های میدان در خارج آن است و این نشان‌دهنده‌ی قوی‌تر بودن میدان در داخل سیملوله است. علاوه بر این خط‌های میدان در داخل سیملوله، بویژه در نقطه‌های نسبتاً دور از لبه‌های سیملوله تقریباً موازی و هم‌فاصله‌اند و این نشانگر یکنواخت بودن میدان مغناطیسی درون سیملوله است. همان‌طور که دیده می‌شود، جهت میدان مغناطیسی در داخل سیملوله خلاف جهت میدان مغناطیسی در خارج آن است.



شکل ۴ــ۲۱ــ میدان مغناطیسی سیملوله

جهت میدان مغناطیسی سیملوله‌ی حامل جریان را نیز می‌توان با استفاده از قاعده‌ی دست راست تعیین کرد.

اگر شعاع قاعده‌ی سیملوله در مقایسه با طول آن کوچک باشد و حلقه‌های سیملوله خیلی به هم نزدیک باشند، میدان مغناطیسی داخل سیملوله در نقطه‌های دور از لبه‌ها یکنواخت است و بزرگی آن از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$B = \mu_0 n I \quad (۴ــ۹)$$

در این رابطه، I جریانی است که از سیملوله می‌گذرد و n تعداد دورهای سیملوله در واحد طول است که از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$n = \frac{N}{l} \quad (۴ــ۱۰)$$

که N تعداد کل دورهای سیملوله و l طول سیملوله است.

مثال ۴ــ۵

از سیملوله‌ای که در هر متر طول آن ۲۰۰۰ دور سیم پیچیده شده است، جریانی به شدت ۳ آمپر عبور می‌کند. بزرگی میدان مغناطیسی را در درون سیملوله (دور از لبه‌ها) به‌دست آورید.

حل: داریم

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = ۴\pi \times ۱۰^{-۷} \times \frac{۲۰۰۰}{۱} \times ۳$$
$$= ۷/۵ \times ۱۰^{-۳} T$$

خط‌های میدان مغناطیسی، منحنی‌های بسته‌ای هستند، و نقطه‌ی آغاز یا پایانی ندارند. این موضوع برای پیچه و سیملوله در شکل‌های ۴ــ ۱۸ و ۴ــ۲۱ دیده می‌شود.

سیملوله با هسته‌ی آهنی ــ آهنربای الکتریکی: در بخش ۴ــ۱ دیدید که اگر یک میله‌ی آهنی را در میدان مغناطیسی قرار دهیم، خاصیّت مغناطیسی در آن القا خواهد شد. می‌توانیم میله‌ی آهنی را درون یک سیملوله‌ی حامل جریان که میدان در آنجا از هر جای دیگر در اطراف سیملوله قوی‌تر است جای دهیم. در این‌صورت، این میله‌ی آهنی را **هسته‌ی سیملوله** می‌نامند. پیش از آنکه جریانی از سیملوله عبور کند، سیملوله و هسته‌ی آهنی خاصیت مغناطیسی ندارند. اما وقتی جریانی در سیملوله برقرار می‌کنیم، میدان مغناطیسی سیملوله، خاصیت مغناطیسی در هسته‌ی آهنی القا می‌کند و هسته‌ی آهنی آهنربا می‌شود. این آهنربا را **آهنربای الکتریکی** می‌نامند.

به این ترتیب خاصیت آهنربایی آهنربای الکتریکی را می‌توانیم قطع و وصل کنیم. هرچه تعداد دورهای سیملوله در واحد طول بیش‌تر باشد و جریانی که از آن می‌گذرد بزرگ‌تر باشد آهنربای الکتریکی قوی‌تر خواهد بود.

وجود هسته‌ی آهنی باعث تقویت میدان مغناطیسی سیملوله می‌شود. سیملوله‌ی بدون هسته‌ی آهنی دارای میدان مغناطیسی ضعیفی است که در عمل کاربردی ندارد.

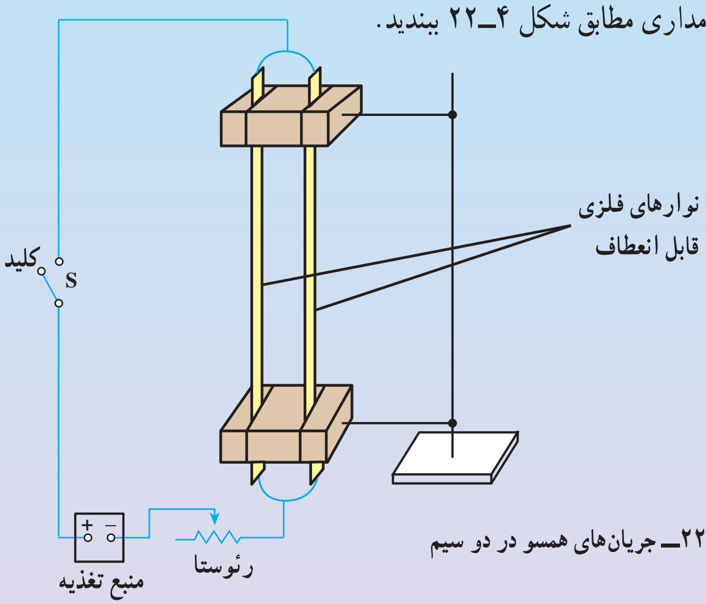
۴ــ۶ــ نیروی بین سیم‌های موازی حامل جریان

در آزمایش اورستد، دیدیم که در فضای اطراف هر سیم حامل جریان میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. هم‌چنین در بخش ۴ــ۲ دیدیم که آهنربا بر سیم حامل جریان نیرو وارد می‌کند. حال فرض کنید که برای ایجاد میدان مغناطیسی به‌جای آهنربا از یک سیم حامل جریان استفاده کنیم. اگر سیم حامل جریان دیگری را در مجاورت این سیم قرار دهیم، آیا بر آن نیرویی وارد می‌شود؟ برای پاسخ دادن به این پرسش آزمایش ۴ــ۶ را انجام دهید.

آزمایش ۴ـ۶

وسیله‌های آزمایش: دو نوار فلزی نازک قابل انعطاف به پهنای تقریبی یک سانتی‌متر، دو پایه‌ی نارسانا (چوبی)، رئوستا، منبع تغذیه‌ی جریان یکنواخت، کلید قطع و وصل و سیم رابط.

۱ــ مداری مطابق شکل ۴ــ۲۲ ببندید.

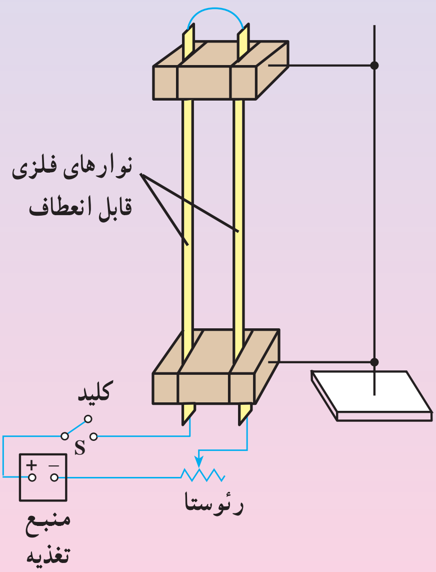


شکل ۴ــ۲۲ــ جریان‌های همسو در دو سیم موازی

۲ــ با وصل کردن کلید، جریان را در مدار برقرار کنید. توجه کنید که جریان در دو سیم موازی و همسو است. مشاهده‌ی خود را گزارش دهید.

۳ــ مداری مطابق شکل ۴ــ۲۳ ببندید.

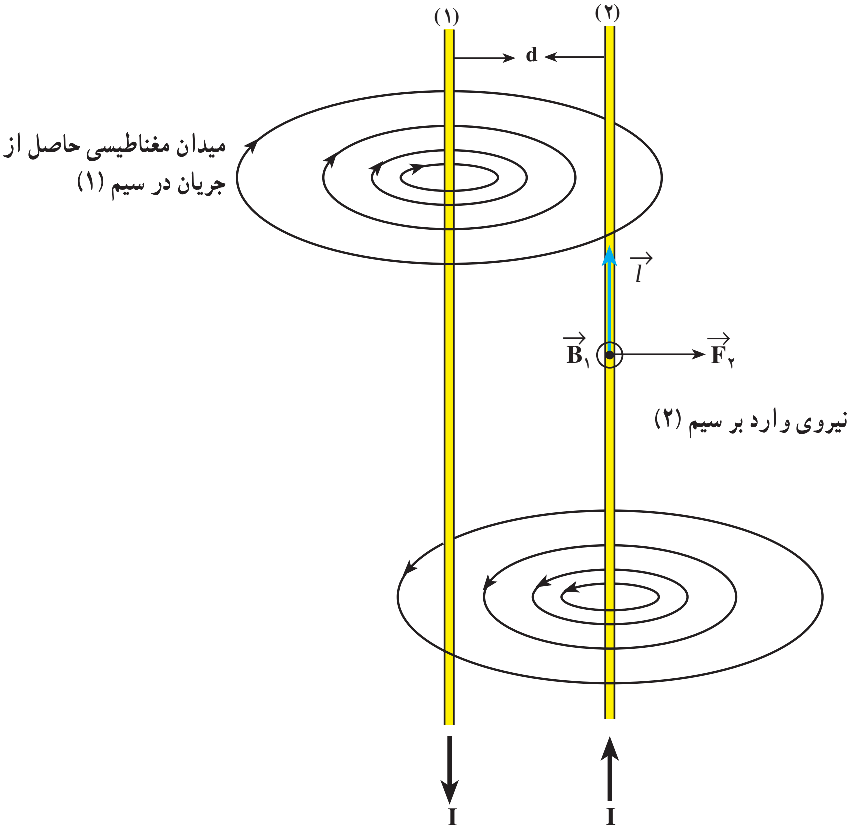
۴ــ با وصل کردن کلید، جریان را در مدار برقرار کنید. در این حالت جریان در دو سیم در جهت‌های مخالف است. مشاهده‌های خود را گزارش دهید.



شکل ۴ــ۲۳ــ جریان‌های در جهت‌های مخالف در دو سیم موازی

آزمایش صفحه‌ی قبل نشان می‌دهد که سیم‌های حامل جریان الکتریکی بر یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. هرگاه جریانی که از دو سیم می‌گذرد همسو باشد (شکل ۴ــ۲۲)، دو سیم یک‌دیگر را می‌ربایند، و اگر جریانی که از دو سیم می‌گذرد در جهت‌های مخالف باشد (شکل ۴ــ۲۳) دو سیم یک‌دیگر را می‌رانند.

نیرویی را که بر هر سیم وارد می‌شود، می‌توان برحسب میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در سیم دیگر توضیح داد. برای این‌کار، دو سیم مستقیم و خیلی دراز موازی را که حامل جریان I هستند و به فاصله‌ی d از یک‌دیگر قرار گرفته‌اند، مطابق شکل ۴ــ۲۴ درنظر می‌گیریم. جریان الکتریکی در سیم شماره‌ی (۱) در فضای اطراف آن، میدان مغناطیسی $(\vec{B}_1)$ را ایجاد می‌کند. جهت میدان $\vec{B}_1$ در محل سیم شماره‌ی (۲) همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است برونسو است. چون سیم شماره‌ی (۲) نیز حامل جریان الکتریکی I است، میدان $\vec{B}_1$ بر آن نیرو وارد می‌کند. این نیرو را در شکل با $\vec{F}_2$ نشان داده‌ایم، جهت $\vec{F}_2$ با استفاده از قاعده‌ی دست راست تعیین می‌شود.



شکل ۴ــ۲۴ــ جهت نیروها و میدان‌های مغناطیسی مربوط به دو سیم موازی حامل جریان‌های در جهت مخالف

تمرین ۴ـ۲

جهت نیروی وارد بر سیم شماره‌ی (۱) در شکل ۴ ــ ۲۴ را با استدلالی مشابه تعیین کنید.

فعالیت ۴ـ ۸

جهت نیروها و میدان‌های مغناطیسی مربوط به دو سیم موازی حامل جریان‌های همسو را با رسم شکل و استفاده از قاعده‌ی دست راست مشخص کنید.

تمرین ۴ـ۳

از دو سیم بلند موازی که به فاصله‌ی d از یک‌دیگر قرار دارند، جریانی به‌شدت I می‌گذرد، جهت جریان در هر دو سیم یکسان است، نیرویی را که به یک متر از هر یک از سیم‌ها وارد می‌شود به‌دست آورید.

دیدیم که دو سیم مستقیم دراز و موازی حامل جریان با توجه به جهت جریان بر هم نیروهای ربایشی یا رانشی وارد می‌کنند، این واقعیت، اساس تعریف عملیاتی* یکای شدت جریان یعنی آمپر در SI است. مطابق این تعریف :

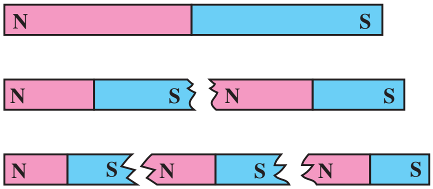
هرگاه از دو سیم نازک، موازی، مستقیم و بسیار دراز، که به فاصله‌ی یک متر از یک‌دیگر در خلأ قرار دارند، جریان‌های مساوی عبور کند ــ به‌گونه‌ای که بر یک متر از طول هر یک از سیم‌ها نیرویی برابر ۲×۱۰^{-۷} نیوتون وارد شود ــ جریانی که از هر یک از سیم‌ها می‌گذرد، برابر یک آمپر است.

۴ــ۷ــ خاصیّت مغناطیسی مواد

پیش از این دیدیم که برخی مواد خاصیّت آهنربایی دارند، و در برخی مواد دیگر در حضور میدان مغناطیسی خاصیّت آهنربایی القا می‌شود. برای نمونه هسته‌ی آهنی یک آهنربای الکتریکی را به‌یاد بیاورید. این سؤال پیش می‌آید که منشأ این رفتار مواد چیست؟ در این بخش به بررسی این موضوع می‌پردازیم.

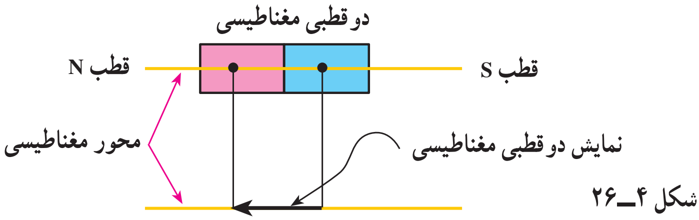
* تعریف عملیاتی یکا به معنای ارائه‌ی روش اندازه‌گیری آن یکا است.

یکی از ویژگی‌های جالب آهنرباها این است که اگر آهنربایی را به دو یا چند قطعه بشکنیم، هر قطعه نیز خود یک آهنربا با دو قطب N و S است (شکل ۴ــ۲۵). آزمایش‌ها نشان می‌دهند که هرقدر این عمل شکستن را ادامه دهیم، باز هم قطعه‌های حاصل دارای دو قطب N و S خواهند بود. می‌توان چنین نتیجه گرفت که قطب N از قطب S جداشدنی نیست و کوچکترین ذره‌های تشکیل‌دهنده‌ی آهنرباها (یعنی اتم‌ها یا مولکول‌ها) نیز آهنربا هستند و دو قطب N و S دارند.



شکل ۴ــ۲۵ــ هر قطعه از یک آهنربا، یک دوقطبی مغناطیسی است.

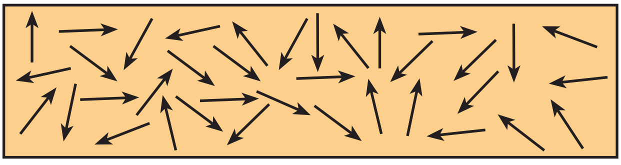
این آهنرباهای کوچک را **دوقطبی مغناطیسی** می‌نامند؛ زیرا هر یک همواره دو قطب N و S دارند. خطی را که دو قطب یک دوقطبی مغناطیسی را به هم متصل می‌کند، **محور مغناطیسی** آن می‌نامند. یک دوقطبی مغناطیسی را با یک پیکان نمایش می‌دهند (شکل ۴ــ۲۶).



شکل ۴ــ۲۶

موادی را که اتم‌ها یا مولکول‌های سازنده‌ی آن‌ها خاصیت مغناطیسی دارند، **مواد مغناطیسی** می‌نامند. نحوه‌ی سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی کوچک در مواد مغناطیسی مختلف، متفاوت است. به همین دلیل مواد از لحاظ ویژگی‌های مغناطیسی نیز با هم تفاوت دارند. در ادامه، به بررسی برخی از مواد مغناطیسی می‌پردازیم.

مواد پارامغناطیس: دوقطبی‌های مغناطیسی در یک ماده‌ی پارامغناطیسی دارای سمت‌گیری مشخص و منظمی نیستند و در جهت‌های کاتوره‌ای قرار دارند (شکل ۴ــ۲۷). درنتیجه این مواد خاصیت مغناطیسی ندارند. اگر آن‌ها را درون یک میدان مغناطیسی (مثلاً نزدیک یک آهنربا) قرار دهیم، دوقطبی‌های کوچک مانند عقربه‌های مغناطیسی در نزدیکی آهنربا رفتار می‌کنند؛ یعنی، در

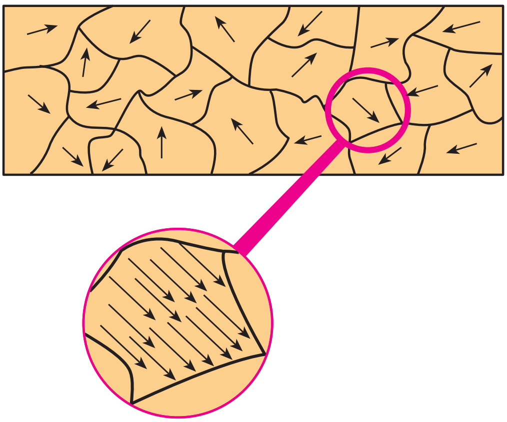

شکل ۴ــ۲۷ــ سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی در ماده‌ی پارامغناطیس در غیاب میدان مغناطیسی

راستای خط‌های میدان مغناطیسی منظم می‌شوند. هرچه میدان مغناطیسی قوی‌تر باشد، تعداد بیش‌تری از این دوقطبی‌های مغناطیسی کوچک با میدان هم‌خط می‌شوند. درنتیجه، خاصیت مغناطیسی ماده بیش‌تر می‌شود.

اگر آهنربا را از این مواد دور کنیم، دوقطبی‌های مغناطیسی دوباره به سرعت به وضعیت کاتوره‌ای که در غیاب میدان داشتند، برمی‌گردند.

به‌این ترتیب، مواد پارامغناطیس در میدان‌های مغناطیسی قوی خاصیت مغناطیسی پیدا می‌کنند. منگنز، پلاتین، آلومینیم، فلزهای قلیایی و قلیایی خاکی، اکسیژن و اکسید ازت از جمله مواد پارامغناطیسی‌اند.

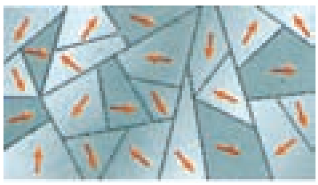
مواد فرومغناطیس: در برخی از مواد مغناطیسی، دوقطبی‌های مغناطیسی کوچک به‌طور خود به خود با دوقطبی‌های مجاور خود هم‌خط می‌شوند. این‌گونه مواد را **فرومغناطیس** می‌نامند. در عمل، همه‌ی بخش‌های مغناطیسی در یک ماده‌ی فرومغناطیس در یک راستا قرار ندارند بلکه این‌گونه مواد مانند شکل ۴ــ ۲۸ از بخش‌های بسیار کوچکی با ابعاد خیلی کم‌تر از میلی‌متر تشکیل شده‌اند به‌طوری که دوقطبی‌های مغناطیسی درون هر بخش به‌طور کامل، هم‌خط‌اند. ولی سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی هر بخش با بخش‌های مجاور آن تفاوت دارد. هر بخش را یک **حوزه‌ی مغناطیسی** می‌نامند.



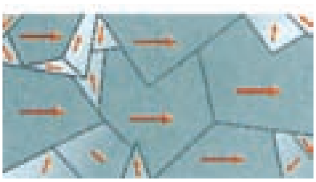
شکل ۴ــ۲۸ــ یک ماده‌ی فرومغناطیس در حالت طبیعی

ممکن است سمت‌گیری و اندازه‌ی حوزه‌های مغناطیسی در یک ماده‌ی فرومغناطیس به‌گونه‌ای باشد که در کل اثر یک‌دیگر را خنثی کنند و ماده در مجموع، آهنربا نباشد (شکل ۴ــ۲۹ الف).

این‌گونه مواد را می‌توان با قرار دادن در یک میدان مغناطیسی آهنربا کرد. اثر میدان مغناطیسی خارجی بر حوزه‌های مغناطیسی باعث می‌شود که دوقطبی‌های مغناطیسی هر حوزه تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گیرند و جهت آن‌ها به جهت میدان خارجی متمایل شود. علاوه بر این حوزه‌هایی که نسبت به میدان در وضع مناسبی قرار دارند (با میدان همسویند) رشد می‌کنند ؛ یعنی، حجمشان زیاد می‌شود و درنتیجه، حوزه‌هایی که سمت‌گیری آن‌ها نسبت به میدان مناسب نیست، کوچک شوند ؛ یعنی، مرز بین حوزه‌ها جابه‌جا می‌شود، و درنتیجه ماده در مجموع خاصیت آهنربایی پیدا می‌کند، شکل ۴ــ۲۹ ب. حرکت مرز حوزه‌ها در مواد فرومغناطیسی به‌صورت طرح وار در شکل ۴ــ۳۰ نشان داده شده است. در شکل ۴ــ۳۰ الف یک ماده‌ی فرومغناطیسی با چهار حوزه در میدان خارجی صفر قرار دارد. سمت‌گیری حوزه‌های مغناطیسی در این شکل به‌صورتی است که در کل ماده دارای خاصیت مغناطیسی نیست. در شکل ۴ــ۳۰ ب ماده‌ی فرومغناطیسی را در یک میدان مغناطیسی خارجی $\vec{B}$ قرار داده‌ایم : مرزهای حوزه‌ها جابه‌جا شده‌اند و درنتیجه، ماده در مجموع خاصیت مغناطیسی پیدا کرده است. در شکل ۴ــ۳۰ پ میدان مغناطیسی خارجی آن‌قدر قوی است که حجم حوزه‌های با سمت‌گیری نامناسب عملاً به صفر رسیده است و همه‌ی حجم ماده را حوزه‌ی با سمت‌گیری مناسب (همسو با میدان) اشغال کرده است. در این حالت ماده در مجموع بیش‌ترین خاصیت آهنربایی را دارد.

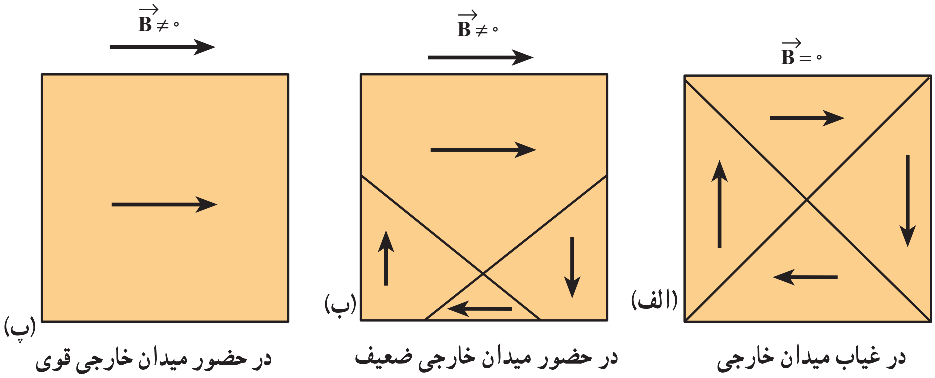


(الف) ماده‌ی فرومغناطیسی آهنربا نیست.



(ب) ماده‌ی فرومغناطیسی آهنربا است.

شکل ۴ــ۲۹ــ حوزه‌های مغناطیسی



شکل ۴ــ۳۰ــ جابه‌جا شدن مرزهای بین حوزه‌ها در مواد فرومغناطیسی

در برخی از مواد فرومغناطیس مانند آهن، کبالت و نیکل درصورتی که خالص باشند، حجم حوزه‌ها به سهولت تغییر می‌کند و در نتیجه به سهولت به روش ذکر شده آهنربا می‌شوند و خاصیت آهنربایی خود را نیز به‌راحتی از دست می‌دهند. این مواد را **فرومغناطیس نرم** می‌نامند. از این‌گونه مواد در هسته‌ی سیملوله‌ها استفاده می‌شود. مواد فرومغناطیس نرم با حذف میدان مغناطیسی خارجی خاصیت آهنربایی خود را از دست می‌دهند و به‌دلیل همین خاصیت، آن‌ها برای ساختن آهنرباهای الکتریکی (آهنرباهای غیردائم) مناسب‌اند.

برخی دیگر از مواد مانند فولاد (آهن به‌اضافه‌ی دو درصد کربن)، آلیاژهای دیگری از آهن، کبالت و نیکل به سختی آهنربا می‌شوند ؛ یعنی، حجم حوزه‌ها در آن‌ها به سختی تغییر می‌کند. این مواد را **فرومغناطیس سخت** می‌نامند. در این‌گونه مواد برای افزایش حجم حوزه‌هایی که سمت‌گیری مناسب دارند (یعنی با میدان همسو هستند) به میدان‌های مغناطیسی خارجی قوی‌تری نیاز است. در این مواد، سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی حوزه‌ها پس از حذف میدان خارجی به سهولت تغییر نمی‌کند. به عبارت دیگر، پس از برداشتن میدان مغناطیسی خارجی، ماده‌ی فرومغناطیس سخت، خاصیت آهنربایی خود را حفظ می‌کند. به همین دلیل این مواد برای ساختن آهنرباهای دائمی مناسب‌اند.

برای خاصیت آهنربایی هر ماده‌ی فرومغناطیس مقدار بیشینه‌ای وجود دارد. این وضعیت هنگامی پیش می‌آید که ماده‌ی فرومغناطیس در یک میدان مغناطیسی بسیار قوی قرار گیرد ؛ به‌طوری که همه‌ی دوقطبی‌های مغناطیسی اتمی در همه‌ی حوزه‌ها به موازات هم به خط شوند.

مطالعه‌ی آزاد

میدان مغناطیسی زمین و اثرهای آن

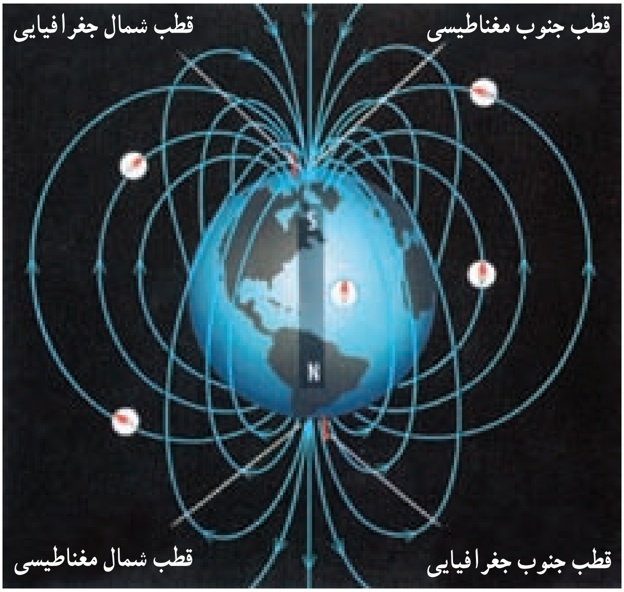
بشر از گذشته‌های بسیار دور به خاصیت مغناطیسی زمین پی برده است. ملّاحان و جهانگردان در کارهای جاری خود همواره از قطب‌نما استفاده می‌کنند. اثرهای میدان مغناطیسی زمین نیز بر زندگی جانوران و گیاهان، موضوعی جالب و بحث‌انگیز برای پژوهشگران است. مثلاً پژوهش‌هایی در قرن بیستم نشان داد که در مغز برخی از پرندگان کوچنده، ساز و کاری جهت تشخیص راستای میدان مغناطیسی زمین موجود است.

در سال ۱۹۵۸ میلادی (۱۳۳۷ هجری خورشیدی) با پژوهش‌هایی که توسط

ماهواره‌ی اکسپلوررِ* اول انجام گرفت، معلوم شد، در اطراف زمین ناحیه‌ای به‌نام کمربند وان‌آلن موجود است، که دارای خاصیّت مغناطیسی بوده و ذرّات باردار تابیده از پرتوهای کیهانی و خورشیدی در این ناحیه به دام می‌افتند.

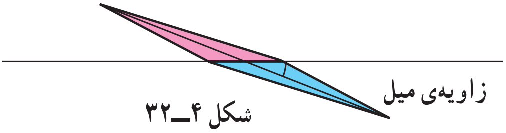
راستای میدان مغناطیسی زمین ثابت نیست و در طول قرن‌های متمادی در تغییر بوده است. اکنون قطب جنوب آن در کانادا است.

زاویه‌ای که راستای شمال ــ جنوب جغرافیا با راستای میدان مغناطیسی می‌سازد **زاویه‌ی انحراف** نام دارد.



شکل ۴ــ۳۱

همچنین راستای میدان مغناطیسی در نقاط مختلف زمین در راستای افق قرار ندارد. زاویه‌ای که عقربه‌ی مغناطیسی با راستای افق تشکیل می‌دهد **زاویه‌ی میل** نام دارد.



شکل ۴ــ۳۲

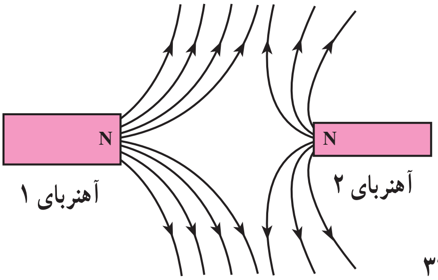
---

* Explorer

تمرین های فصل چهارم

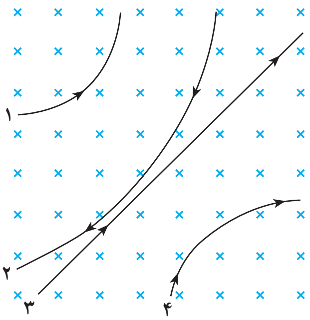
۱ــ الف ــ آهنربایی با قطب‌های نامشخص در اختیار داریم. حداقل دو روش برای تعیین قطب‌های این آهنربا، بیان کنید.

ب ــ خط‌های میدان مغناطیسی میان دو آهنربا در شکل ۴ــ۳۳ نشان داده شده است. کدام آهنربا ضعیف‌تر است؟



شکل ۴ــ۳۳

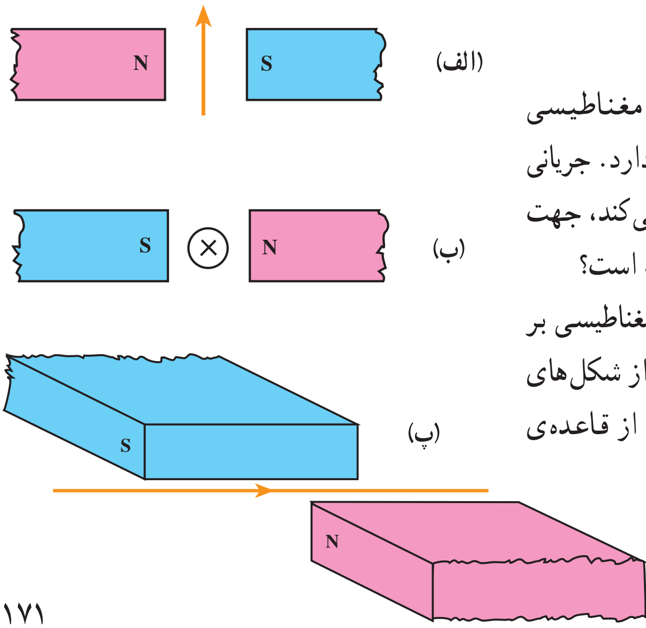
۲ــ چهار ذره هنگام عبور از میدان مغناطیسی درونسو مسیرهایی مطابق شکل ۴ــ۳۴ می‌پیمایند. درباره‌ی نوع بار هر ذره چه می‌توان گفت؟



شکل ۴ــ۳۴

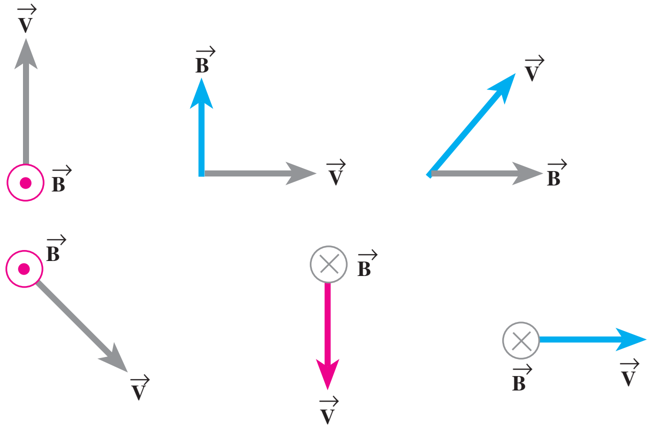
۳ــ سیم قائمی در میدان مغناطیسی زمین (که رو به شمال است) قرار دارد. جریانی از پایین به‌بالا از این سیم عبور می‌کند، جهت نیروی وارد بر این جریان چگونه است؟

۴ــ جهت نیروی الکترومغناطیسی بر سیم حامل جریان را در هر یک از شکل‌های ۴ــ۳۵ الف، ب و پ با استفاده از قاعده‌ی دست راست بیابید.



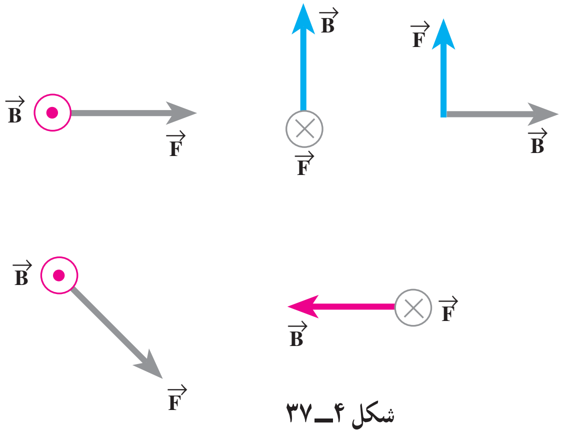
شکل ۴ــ۳۵

۵ــ جهت نیروی وارد بر بار مثبت را در هر یک از نمودارهای شکل ۴ــ۳۶ تعیین کنید.



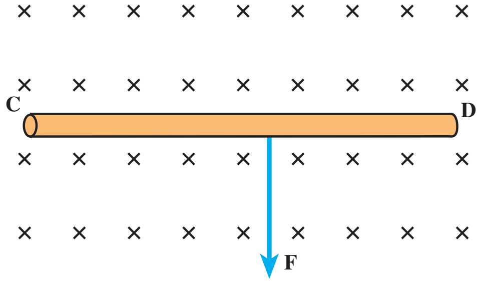
شکل ۴ــ۳۶

۶ــ نیروی $\vec{F}$ وارد بر الکترونی که در میدان مغناطیسی $\vec{B}$ در حرکت است در شکل ۴ــ۳۷ نشان داده شده است. در هر یک از حالت‌های نشان داده شده جهت سرعت الکترون را تعیین کنید. (فرض کنید راستای حرکت الکترون بر میدان مغناطیسی عمود است.)



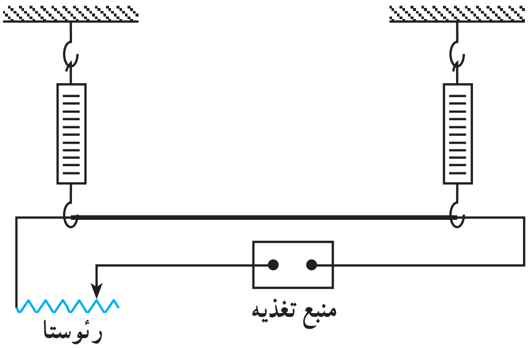
شکل ۴ــ۳۷

۷ ــ سیم رسانای CD به طول ۲m مطابق شکل ۴ــ۳۸ عمود بر میدان مغناطیسی با اندازه‌ی ۰/۵T قرار گرفته است. اگر نیروی الکترومغناطیسی وارد بر سیم برابر ۱N باشد، جهت و اندازه‌ی جریان عبوری از سیم را تعیین کنید.



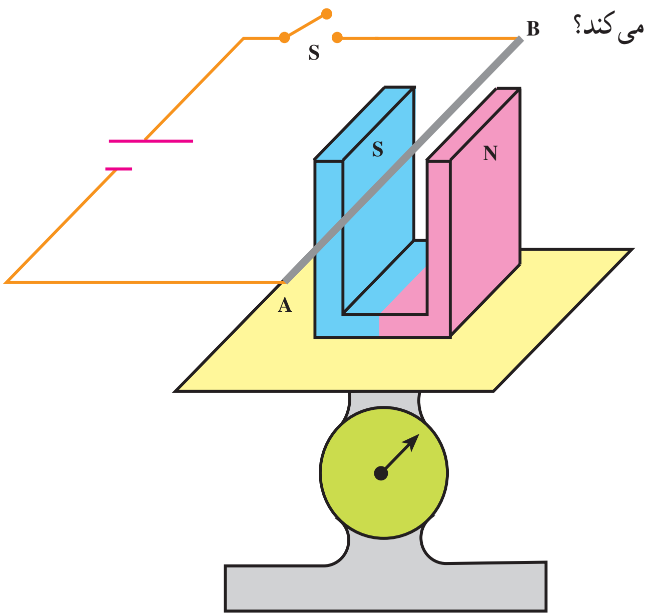
شکل ۴ــ۳۸

۸ ــ یک سیم که حامل جریانی به شدت ۱۶ آمپر است، مطابق شکل ۴ ــ۳۹ توسط دو نیروسنج فنری که به دو انتهای آن بسته شده است، به طور افقی و در راستای غرب به شرق قرار دارد. میدان مغناطیسی زمین را افقی و یکنواخت و دقیقاً به سوی شمال با بزرگی $۰/۰۵\ mT$ بگیرید. (الف) نیروی مغناطیسی وارد بر هر متر این سیم را تعیین کنید. (ب) اگر بخواهیم نیروسنج‌ها عدد صفر را نشان دهند، چه جریانی و در چه جهتی باید از سیم عبور دهیم؟ جرم یک متر از طول این سیم ۸gr است. $(g = ۱۰\ N/kg)$



شکل ۴ــ۳۹

۹ ــ یک آهنربای نعلی شکل را روی کفه‌ی یک ترازوی حساس قرار می‌دهیم، سیم AB را که مطابق شکل ۴ ــ۴۰ در میان دو قطب آهنربا قرار دارد به‌وسیله‌ی یک کلید به دو پایانه‌ی یک باتری وصل می‌کنیم. آیا با بستن کلید عددی که ترازو نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ توضیح دهید.



شکل ۴ ــ۴۰

۱۰ــ پروتونی با سرعت $۴/۴\times ۱۰^{۶}$ m/s تحت زاویه‌ی ۵۳° با میدان مغناطیسی‌ای به بزرگی ۱۸mT در حرکت است.

الف) بزرگی نیروی وارد بر این پروتون را محاسبه کنید.

ب) اگر این نیرو تنها نیرویی باشد که بر پروتون وارد می‌شود، شتاب پروتون را حساب کنید.

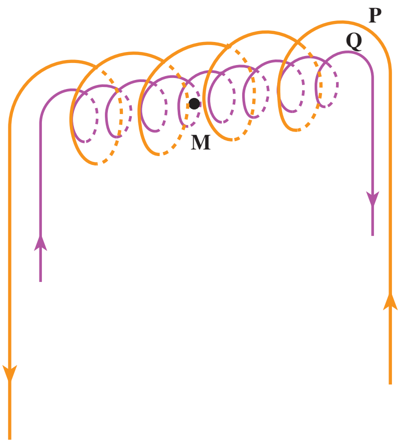
(بار الکتریکی پروتون $۱/۶\times ۱۰^{-۱۹}$C و جرم آن $۱/۷\times ۱۰^{-۲۷}$kg است).

۱۱ــ راستای نیروی وارد بر یک الکترون متحرک در میدان الکتریکی را با راستای نیروی وارد بر این الکترون در میدان مغناطیسی مقایسه کنید.

۱۲ــ از پیچه‌ی مسطحی به شعاع ۵cm که از ۲۰۰ دور سیم نازک درست شده است، جریان ۱۲A می‌گذرد. میدان مغناطیسی را در مرکز پیچه حساب کنید.

۱۳ــ سیملوله‌ای شامل ۲۵۰ دور حلقه است که دور یک لوله‌ی پلاستیکی تو خالی به طول ۰/۱۴ متر پیچیده شده است. اگر جریان گذرنده از سیملوله A ۰/۸ باشد، بزرگی میدان مغناطیسی در درون سیملوله را حساب کنید.

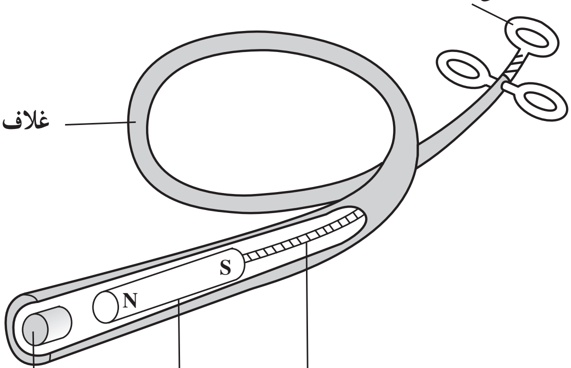
۱۴ــ دو سیملوله‌ی P و Q هم محور دارای طول برابر ولی تعداد دور متفاوت هستند (شکل ۴ ــ ۴۱). تعداد دور سیملوله‌ی P برابر ۲۰۰ و تعداد دور سیملوله‌ی Q برابر ۳۰۰ است. اگر جریان ۱A از سیملوله‌ی Q عبور کند، از سیملوله‌ی P چه جریانی باید عبور کند تا برآیند میدان مغناطیسی ناشی از دو سیملوله در نقطه‌ی M (روی محور دو سیملوله) برابر صفر شود؟



شکل ۴ــ۴۱

۱۵ــ الکترونی با سرعت $۲/۴\times۱۰^{۵}$ m/s در یک میدان مغناطیسی در حرکت است. نیرویی که از طرف میدان مغناطیسی بر این الکترون وارد می‌شود، هنگامی بیشینه است که الکترون به سمت جنوب حرکت کند. (الف) اگر این نیروی بیشینه بالاسو و برابر $۶/۸\times۱۰^{-۱۴}$N باشد، بزرگی و جهت میدان مغناطیسی را تعیین کنید. (ب) چه میدان الکتریکی همین نیرو را ایجاد می‌کند؟ (بار الکتریکی الکترون $-۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$C است).

۱۶ــ کودکی یک قطعه‌ی کوچک فلز را بلعیده است که در گلوی او گیر کرده است. پزشک با دستگاهی که در شکل ۴ــ۴۲ دیده می‌شود، می‌خواهد فلز را بیرون بیاورد.



شکل ۴ــ۴۲

الف) هنگامی که آهنربای دائم به نوک ثابت آهنی نزدیک می‌شود چه اتفاقی می‌افتد؟

ب) آهن برای ساختن نوک ثابت چه مزیتی دارد؟

پ) این وسیله را باید به درون گلوی کودک وارد و به سوی فلز بلعیده شده هدایت کرد. چرا غلاف باید انعطاف‌پذیر باشد؟

ت) پزشک می‌خواهد یک گیره‌ی آهنی کاغذ و یک واشر آلومینیومی را از گلوی کودک بیرون بیاورد. کدامیک را می‌توان بیرون آورد؟ چرا؟

۵



القای الکترومغناطیسی مبنای تولید انرژی الکتریکی در مولدهای جریان متناوب است. برای انتقال انرژی الکتریکی تا فاصله‌های خیلی دور از خطوط انتقال با ولتاژ بالا استفاده می‌شود.

فصل ۵

القای الکترومغناطیسی

۵ــ۱ــ پدیده‌ی القای الکترومغناطیسی

در فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که با استفاده از روش القای الکتریکی می‌توان اجسام رسانا را باردار کرد. در فصل قبل نیز با پدیده‌ی القای مغناطیسی آشنا شدیم. در پدیده‌ی اول در اثر القا، بار الکتریکی در ماده‌ی رسانا پدیدار می‌شود. در پدیده‌ی دوم، در اثر القا در ماده‌ی فرومغناطیس خاصیّت مغناطیسی ایجاد می‌شود. پدیده‌ی القایی دیگری نیز وجود دارد که در آن، جریان الکتریکی در یک رسانا القا می‌شود. این پدیده را القای الکترومغناطیسی می‌نامند. با انجام آزمایش زیر با این پدیده آشنا می‌شوید.

آزمایش ۵ــ۱

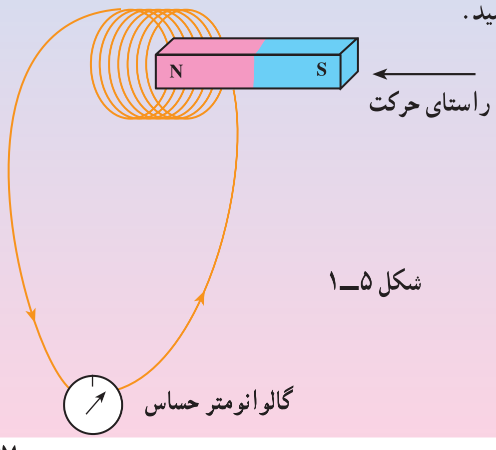
وسیله‌های آزمایش: میلی‌آمپرسنج صفر وسط (گالوانومتر)، آهنربای میله‌ای، پیچه و سیم رابط.

۱ــ با پیچه و گالوانومتر مداری مانند شکل ۵ــ۱ را ببندید.

۲ــ قطب N آهنربای میله‌ای را مطابق شکل به پیچه نزدیک کنید. آن چه را که در حین انجام‌دادن این عمل می‌بینید، یادداشت کنید.

۳ــ قطب N آهنربای میله‌ای را نزدیک پیچه نگه دارید. سپس آن‌را از پیچه دور کنید. آن‌چه را مشاهده می‌کنید، بنویسید.

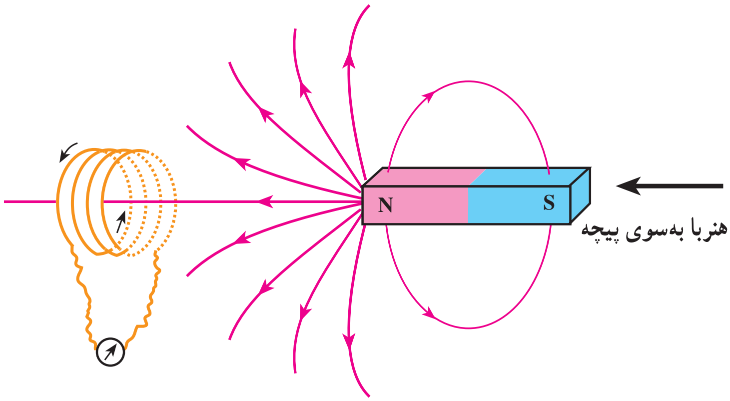
۴ــ بندهای ۲ و ۳ را با قطب S آهنربا نیز انجام دهید.



شکل ۵ــ۱

در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فارادی دانشمند انگلیسی و تقریباً همزمان با او جوزف هانری دانشمند امریکایی، با انجام‌دادن آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۵ــ۱ دریافتند که با دور و نزدیک‌کردن آهنربا به پیچه، عقربه‌ی میلی آمپرسنج منحرف می‌شود، و عبور جریانی را از مدار نشان می‌دهد ؛ مانند وقتی که در مدار یک مولّد وجود داشته باشد. یعنی با حرکت آهنربا نسبت به پیچه، یک جریان الکتریکی در مدار القا می‌شود. این پدیده را القای الکترومغناطیسی و جریان تولید شده را جریان الکتریکی القایی می‌نامند. القای الکترومغناطیسی اساس کار مولّد جریان متناوب، دینام، مبدل‌ها و بسیاری از وسیله‌های الکتریکی است.

دور یا نزدیک شدن آهنربا به پیچه باعث تغییر میدان مغناطیسی در محل پیچه می‌شود (شکل ۵ــ۲) و همین امر جریان الکتریکی القایی را در پیچه ایجاد می‌کند. پس می‌توان چنین نتیجه گرفت که : **تغییر اندازه‌ی میدان مغناطیسی در محل یک مدار بسته باعث القای جریان الکتریکی در آن مدار می‌شود.**

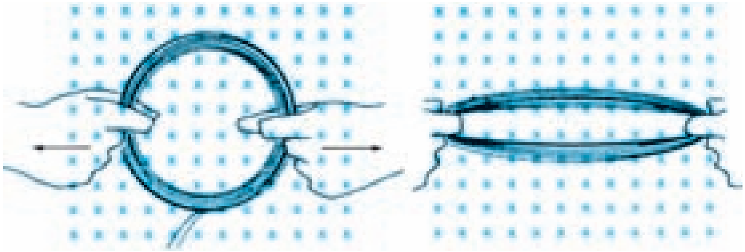


شکل ۵ــ۲

آزمایش نشان می‌دهد که علاوه‌بر روش گفته شده، به روش‌های دیگر نیز می‌توان در یک پیچه جریان الکتریکی القا کرد.

اگر پیچه‌ای از یک سیم انعطاف‌پذیر را مطابق شکل ۵ــ۳ در میدان مغناطیسی یکنواخت B قرار دهیم، سپس پیچه را تغییر شکل دهیم به‌گونه‌ای که مساحت حلقه‌ی پیچه تغییر کند، خواهیم دید که در حین این عمل جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که :

تغییر مساحت مدار بسته در میدان مغناطیسی نیز می‌تواند عامل ایجاد جریان القایی شود.



شکل ۵ــ۳ــ با تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود.

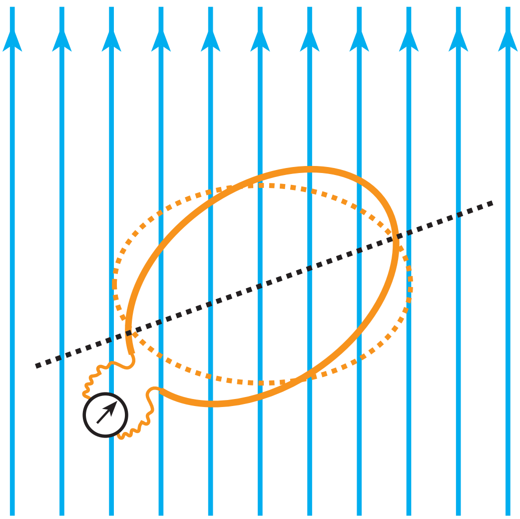
با انجام‌دادن فعالیّت زیر، با یک روش دیگر ایجاد جریان الکتریکی القایی آشنا می‌شوید.

فعالیت ۵ـ۱

یک آهنربای میله‌ای را در نزدیکی یک پیچه قرار دهید. بدون آنکه فاصله‌ی آهنربا از پیچه را تغییر دهید، پیچه را بچرخانید. هر تغییری را که در گالوانومتر مشاهده می کنید، بنویسید.

با چرخاندن پیچه در میدان مغناطیسی یکنواخت مطابق شکل ۵ــ۴، بزرگی میدان مغناطیسی و مساحت حلقه‌ی مدار تغییر نمی کند، ولی زاویه‌ی بین میدان مغناطیسی و سطح پیچه تغییر می کند. از این فعالیّت نیز می‌توان نتیجه گرفت که :

تغییر زاویه‌ی بین حلقه و راستای میدان مغناطیسی نیز می‌تواند عامل برقراری جریان الکتریکی القایی شود.



شکل ۵ــ۴ــ در حین چرخش پیچه در میدان مغناطیسی و تغییر زاویه‌ی بین پیچه و راستای میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود.

۵ــ۲ــ شار مغناطیسی

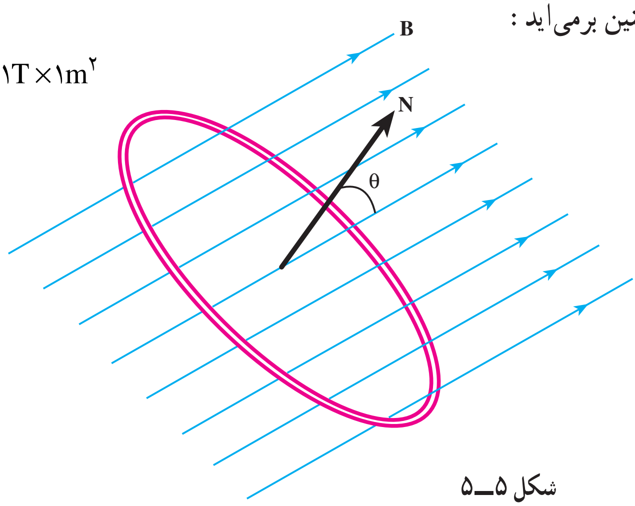
در آزمایش‌های قبل دیدیم که در اثر تغییر میدان مغناطیسی در حلقه، تغییر مساحت حلقه، و یا تغییر زاویه‌ی بین سطح حلقه و جهت میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود. کمیتی به نام شار مغناطیسی، این سه کمیت را دربر دارد. این کمیت نرده‌ای به‌صورت زیر معرفی می‌شود. فرض کنید حلقه‌ای به مساحت A مطابق شکل ۵ــ۵ در میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ قرار دارد.

شار میدان مغناطیسی یکنواخت* که از سطح حلقه می‌گذرد به‌صورت زیر تعریف و با نماد Φ نمایش داده می‌شود.

$$\Phi \quad BA\cos\theta \qquad (۱ــ۵)$$

که در این رابطه، θ زاویه‌ی بین بردار میدان مغناطیسی $\vec{B}$ و نیم‌خط عمود بر سطح حلقه است (این نیم‌خط را می‌توان به‌طور اختیاری در هر یک از دو طرف سطح حلقه رسم کرد، ولی در هر مورد پس از انتخاب دیگر جهت آن را نباید عوض کرد). یکای شار مغناطیسی در SI وِبر (Wb) است. از معادله‌ی ۵ــ۱ چنین برمی‌آید :

$$۱Wb = ۱T \times ۱m^{۲}$$



شکل ۵ــ۵

مثال ۵ــ۱

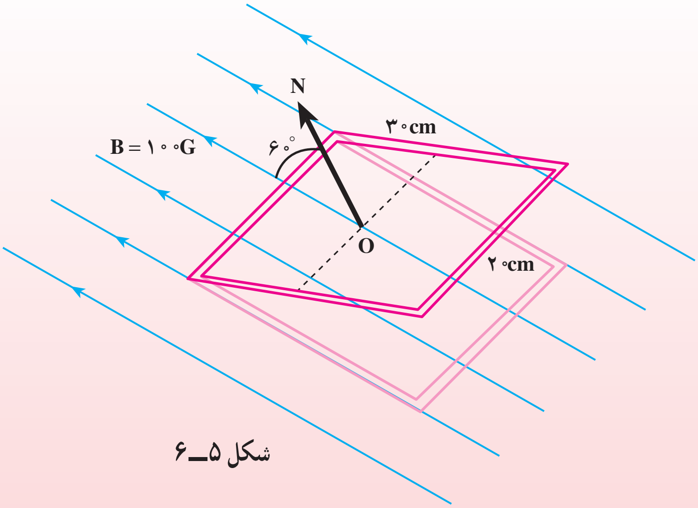
الف) شار مغناطیسی عبوری از سطح یک قاب مستطیلی شکل به‌ابعاد ۲۰cm × ۳۰cm که خط عمود بر آن با میدان مغناطیسی یکنواخت صد گاؤس مطابق

---

* اگر میدان مغناطیسی یکنواخت نباشد، رابطه‌ی مربوط به شار مغناطیسی پیچیده‌تر می‌شود. این رابطه فراتر از سطح برنامه این کتاب است.

شکل ۵ــ۶ زاویه‌ی °۶۰ می‌سازد را به‌دست آورید.

ب) اگر این قاب را بچرخانیم به‌طوری که زاویه‌ی خط عمود بر آن با خط‌های میدان مغناطیسی از °۶۰ به °۳۰ کاهش یابد، شار مغناطیسی چه‌قدر تغییر می‌کند؟



شکل ۵ــ۶

حل: الف) نیم‌خطِ ON را مطابق شکل عمود بر سطح رسم می‌کنیم. زاویه‌ی بین خط‌های میدان و نیم‌خط ON برابر °۶۰ است؛ بنابراین داریم:

$$A = ۳۰ \times ۲۰ = ۶۰۰ cm^۲ = ۶ \times ۱۰^{-۲} m^۲$$

$$B = ۱۰۰ G = ۱۰^{-۲} T$$

$$\Phi = BA\cos\theta = ۱۰^{-۲} \times ۶ \times ۱۰^{-۲} \cos ۶۰^\circ = ۳ \times ۱۰^{-۴} Wb$$

ب) در وضعیت جدید داریم:

$$\theta' = ۳۰^\circ$$

درنتیجه، به‌دست می‌آوریم:

$$\Phi' = BA\cos\theta' = ۱۰^{-۲} \times ۶ \times ۱۰^{-۲} \cos ۳۰^\circ$$

$$\Phi' = ۵/۲ \times ۱۰^{-۴} Wb$$

تغییر شار حاصل از این چرخش برابر است با:

$$\Delta\Phi = \Phi' - \Phi = ۵/۲ \times ۱۰^{-۴} - ۳ \times ۱۰^{-۴}$$

$$\Delta\Phi = ۲/۲ \times ۱۰^{-۴} Wb$$

تمرین ۵ــ۱

حلقه‌ای به مساحت $۵۰ cm^2$ در یک میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ قرار دارد.
با فرض این که خط‌های میدان مغناطیسی $\vec{B}$ عمود بر سطح حلقه باشند، اگر بزرگی میدان مغناطیسی بدون تغییر جهت آن به اندازه‌ی $۰/۳ T$ افزایش یابد، شار مغناطیسی که از سطح حلقه می‌گذرد، چه‌قدر تغییر می‌کند؟

با انجام‌دادن آزمایش‌ها و فعالیت‌های پیش درمی‌یابیم که تغییر هریک از کمیت‌های A، B و زاویه‌ی بین B و نیم‌خط عمود بر سطح باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، و تغییر شار مغناطیسی باعث ایجاد جریان الکتریکی القایی در مدار می‌شود. درست شبیه به وضعیتی که یک مولّد در مدار باشد، و نیروی محرکه‌ی آن جریانی در مدار ایجاد کرده باشد. علاوه‌بر این آزمایش‌ها نشان می‌دهند که هر چه تغییر شار سریع‌تر اتفاق افتد، جریان القایی و نیروی محرکه‌ی القایی بزرگ‌تر خواهد شد. مثلاً در آزمایش‌های مربوط به شکل‌های ۵ــ۲ تا ۵ــ۴ هر چه حرکتی که باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، سریع‌تر انجام شود، عقربه‌ی گالوانومتر بیش‌تر منحرف می‌شود، و این نشان می‌دهد که جریان بزرگ‌تری به‌وجود آمده است.

لنز، فیزیکدان آلمانی روس‌تبار، و فارادی پدیده‌ی القای الکترومغناطیسی را فرمول‌بندی کردند، و قانون‌های القای الکترومغناطیسی را بیان کردند.

۵ــ۳ــ قانون القای الکترومغناطیسی فارادی

بنابر قانون فارادی **هرگاه شار مغناطیسی‌ای که از مدار بسته‌ای می‌گذرد تغییر کند، نیروی محرکه‌ای در آن القا می‌شود که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار مغناطیسی متناسب است.**

یعنی هرچه آهنگ تغییر شار مغناطیسی بیش‌تر باشد، نیروی محرکه‌ی القایی و درنتیجه جریان ایجاد شده در مدار بیش‌تر خواهد بود. قانون فارادی را می‌توان با رابطه‌ی زیر بیان کرد.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \qquad (۵ــ۲)$$

در این رابطه، ε نیروی محرکه‌ی القایی برحسب ولت و $\frac{d\Phi}{dt}$ آهنگ تغییر شار مغناطیسی (یعنی مشتق شار نسبت به زمان) برحسب وبر بر ثانیه ($\frac{Wb}{s}$) است. علامت منفی نشان‌دهنده‌ی جهت

نیروی محرکه‌ی القایی است که در بخش بعد در مورد آن بیش‌تر سخن می‌گوییم.

نیروی محرکه‌ی القایی در پیچه: هر پیچه را می‌توان به صورت چند حلقه سیم که به‌طور متوالی به هم بسته شده‌اند، در نظر گرفت. تغییر شار مغناطیسی در هر حلقه‌ی پیچه نیروی محرکه‌ای القا می‌کند. نیروی محرکه‌ی القایی کل، برابر مجموع نیروی محرکه‌ی القا شده در حلقه‌هاست. به بیان دیگر، نیروی محرکه‌ی القایی در هر پیچه با تعداد دورهای پیچه (N) نیز نسبت مستقیم دارد؛ یعنی،

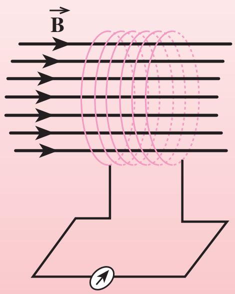
$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} \qquad (۵ــ۳)$$

اگر شار مغناطیسی که از پیچه‌ای با N حلقه می‌گذرد در بازه‌ی زمانی Δt به‌اندازه‌ی $\Delta\Phi$ تغییر کرده باشد، آهنگ متوسط تغییر شار مغناطیسی در بازه‌ی زمانی Δt برابر $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ خواهد بود. نیروی محرکه‌ی القایی متوسط (که با $\bar{\varepsilon}$ نمایش داده می‌شود) ایجاد شده در این پیچه از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$\bar{\varepsilon} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad (۵ــ۴)$$

مثال ۵ــ۲

پیچه‌ای شامل ۲۰۰ دور سیم با مساحت سطح مقطع ۲ سانتی‌مترمربع مطابق شکل ۵ــ۷ در میدان مغناطیسی یکنواختی قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که خط‌های میدان بر سطح آن عمود است. بزرگی میدان مغناطیسی در بازه‌ی زمانی ۳/۲ میلی ثانیه و بدون تغییر جهت از ۰/۱۸T به ۰/۲۲T می‌رسد. اندازه‌ی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط چه‌قدر است؟



شکل ۵ــ۷

حل: ابتدا شاری را که در دو حالت اولیه و نهایی از پیچه می‌گذرد، محاسبه می‌کنیم.

$$\Phi_۱ = B_۱ A\cos\theta = ۰/۱۸\times ۲\times ۱۰^{-۴}\times\cos ۰^\circ = ۳/۶\times ۱۰^{-۵}\ Wb$$

$$\Phi_۲ = B_۲ A\cos\theta = ۰/۲۲\times ۲\times ۱۰^{-۴}\times\cos ۰^\circ = ۴/۴\times ۱۰^{-۵}\ Wb$$

تغییر شار مغناطیسی که از سطح پیچه می‌گذرد، برابر است با :

$$\Delta\Phi = \Phi_{۲} - \Phi_{۱} = ۴/۴\times۱۰^{-۵} - ۳/۶\times۱۰^{-۵} = ۰/۸\times۱۰^{-۵}\,\mathrm{Wb}$$

این تغییر شار در بازه‌ی زمانی $۳/۲\times۱۰^{-۳}$ ثانیه روی داده است ؛ بنابراین، آهنگ متوسط تغییر شار برابر است با :

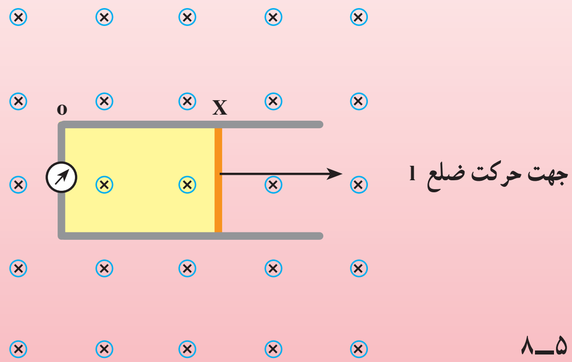
$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{۰/۸\times۱۰^{-۵}}{۳/۲\times۱۰^{-۳}} = ۲/۵\times۱۰^{-۳}\ \frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{s}}$$

درنتیجه بزرگی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط برابر است با :

$$|\bar{\varepsilon}| = \left| -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right| = \left| -۲۰۰\times۲/۵\times۱۰^{-۳}\right| = ۰/۵\,\mathrm{V}$$

مثال ۵ــ۳

قاب مستطیلی شکلی که از سیم بدون روکش ساخته شده است مطابق شکل ۵ــ۸ در میدان مغناطیسی یکنواخت و ثابت با بزرگی $۰/۱۸\mathrm{T}$ قرار گرفته است. سطح حلقه بر میدان مغناطیسی عمود است. اگر ضلع $l = ۲۰\mathrm{cm}$ با سرعت $v = ۲۰\mathrm{m/s}$ در جهتی که در شکل نشان داده شده است حرکت کند بزرگی نیروی محرکه‌ی القایی را محاسبه کنید.



شکل ۵ــ۸

حل: بنابر قانون فارادی، نیروی محرکه‌ی القایی برابر است با $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$ ، که

در آن Φ ، شار مغناطیسی که از حلقه می‌گذرد، برابر است با :

$$\Phi \quad AB\cos\theta$$

در این مسئله، B بزرگی میدان مغناطیسی ثابت است، همچنین θ زاویه‌ی میدان مغناطیسی با نیم‌خط عمود بر حلقه ثابت و برابر صفر است و $\cos\theta = ۱$ ، و تنها مساحت حلقه با زمان تغییر می‌کند. مساحت حلقه در هر لحظه برابر است با :

$$A = lx = lvt$$

درنتیجه آهنگ تغییر مساحت با زمان از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{dA}{dt} = \frac{d(lvt)}{dt} = lv$$

درنتیجه، داریم :

$$|\varepsilon| = \left|-\frac{d\Phi}{dt}\right| = \left|-\frac{d}{dt}(AB)\right| = B\frac{dA}{dt}$$

$$|\varepsilon| = lvB = ۰/۲ \times ۲۰ \times ۰/۱۸$$

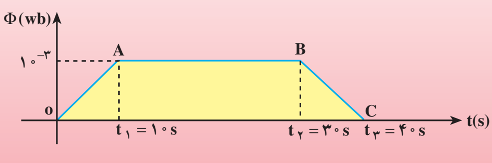
$$= ۰/۷۲\,v = ۷۲۰\,mv$$

تمرین ۵ــ۲

میدان مغناطیسی عمود بر یک قاب دایره‌ای شکل به قطر ۲۰ سانتی‌متر با زمان تغییر می‌کند و در مدت ۰/۵s از ۰/۲۸+ تسلا به ۰/۱۲- تسلا می‌رسد (تغییر علامت نشان می‌دهد که جهت میدان نیز وارون شده است). نیروی محرکه‌ی القایی متوسط در حلقه را حساب کنید.

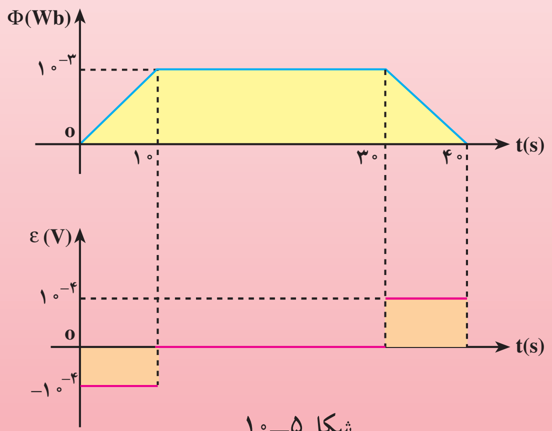
مثال ۵ــ۴

نمودار تغییرات شار مغناطیسی که از یک حلقه می‌گذرد برحسب زمان در منحنی شکل ۵ــ۹ داده شده است. نمودار تغییرات نیروی محرکه‌ی القا شده در حلقه را برحسب زمان رسم کنید.



شکل ۵ــ۹

حل: نمودار تغییرات شار مغناطیسی برحسب زمان نشان می‌دهد که در بازه‌ی زمانی $\Delta t_1 = t_1 - 0$ شار به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. درنتیجه، در این بازه نیروی محرکه‌ی القایی که برابر است با $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$ ، مقداری ثابت (برابر شیب خط OA) و منفی خواهد داشت و مقدار آن برابر است با -10^{-4} ولت. در بازه‌ی زمانی $\Delta t_2 = t_2 - t_1$ شار ثابت مانده است. بنابراین، $\frac{d\Phi}{dt} = 0$ و نیروی محرکه‌ی القایی در این بازه برابر صفر است. در بازه‌ی زمانی $\Delta t_3 = t_3 - t_2$ ، شار به‌صورت خطی کاهش یافته است، $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ ؛ و درنتیجه، نیروی محرکه‌ی القایی در این بازه مثبت است و مقدار آن برابر است با 10^{-4} ولت. نمودار این تغییرات در شکل ۵ــ۱۰ رسم شده است.



شکل ۵ــ۱۰

۵ــ۴ــ محاسبه‌ی جریان القایی

دیدیم که نیروی محرکه‌ی القایی در پیچه (و یا در حلقه) جریانی تولید می‌کند که به آن جریان القایی گفته می‌شود. اگر مقاومت پیچه برابر R باشد، جریان القا شده در آن از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

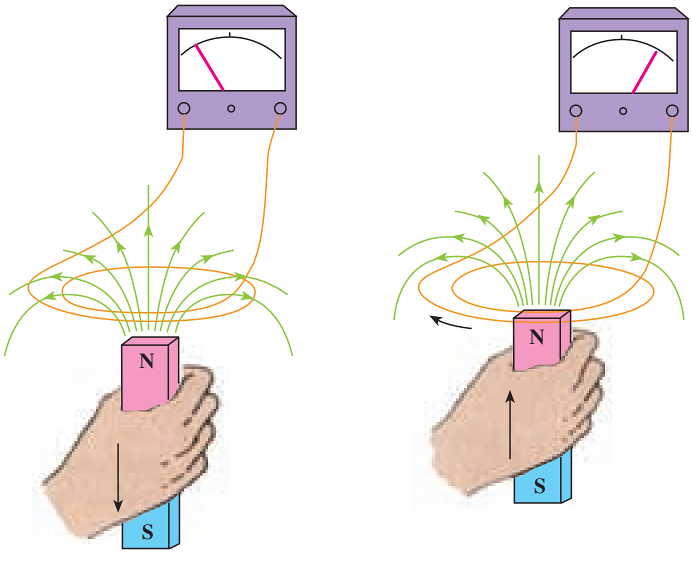
$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{N}{R}\frac{d\Phi}{dt} \qquad (۵ـ۵)$$

قانون لنز که به‌صورت زیر بیان می‌شود، در واقع دستورالعملی است برای تعیین جهت جریان القایی.

جریان القایی در مدار در جهتی است که آثار مغناطیسی ناشی از آن با عامل

به‌وجودآورنده‌ی جریان القایی یعنی تغییر شار مغناطیسی مخالفت می‌کند.

علامت منفی در رابطه‌ی ۵ـ۵ نشان‌دهنده‌ی همین مخالفت است. در عمل، برای به‌دست آوردن جهت جریان القایی در یک مدار از قانون لنز استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر قطب N یک آهنربای میله‌ای را مطابق شکل ۵ــ۱۱ الف به یک پیچه نزدیک کنیم، شار مغناطیسی که از پیچه می‌گذرد، به‌دلیل قوی‌ترشدن میدان در محل پیچه، افزایش می‌یابد. جهت جریان القایی در پیچه همان‌طور که در شکل ۵ــ۱۱ الف نشان داده شده است در جهتی است که میدان مغناطیسی حاصل از آن در خلاف جهت میدان آهنربای میله‌ای باشد، تا با افزایش شار مغناطیسی که از پیچه می‌گذرد مخالفت کند. یعنی قطب N آهنربا را به عقب براند.



(ب) (الف)

شکل ۵ــ۱۱ــ جریان القایی در جهتی است که با حرکت آهنربا به‌طرف پیچه مخالفت می کند.

تمرین ۵ـ۳

قطب N یک آهنربای میله‌ای را مطابق شکل ۵ ــ ۱۱ ب از پیچه دور می کنیم، با استفاده از قانون لنز جهت جریان القایی را در پیچه تعیین کنید.

مثال ۵ـ۶

سیملوله‌ای با ۵۰۰ دور و مقاومت الکتریکی ۱۰Ω و مساحت سطح مقطع $۲۵cm^۲$ در یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد. برای اینکه جریانی به‌شدت $۱mA$ در سیملوله القا شود، میدان مغناطیسی با چه آهنگی باید تغییر کند؟ فرض کنید سطح مقطع سیملوله بر میدان مغناطیسی عمود است.

حل: زاویه‌ی بین میدان و خط عمود بر سطح سیملوله صفر است، درنتیجه داریم :

$$\Phi = BA$$

چون مساحت هر حلقه‌ی سیملوله ثابت است، تغییر Φ در اثر تغییر در بزرگی میدان مغناطیسی است. درنتیجه تغییر شار مغناطیسی برابر است با :

$$\Delta\Phi = A\Delta B$$

از سوی دیگر، با توجه به رابطه‌ی ۵ــ۴ اندازه‌ی جریان القایی برابر است با :

$$I = \left|\frac{N}{R}\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right| = \left|\frac{N}{R}\frac{A\Delta B}{\Delta t}\right|$$

$$= \frac{NA}{R}\left|\frac{\Delta B}{\Delta t}\right|$$

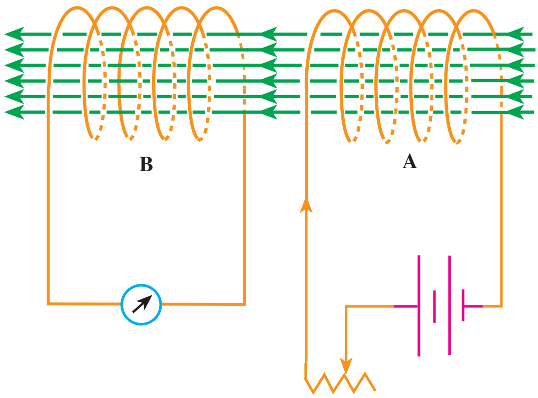
$$۱۰^{-۳}A = \frac{۵۰۰\times۲۵\times۱۰^{-۴}m^۲}{۱۰\Omega}\left|\frac{\Delta B}{\Delta t}\right|$$

$$\left|\frac{\Delta B}{\Delta t}\right| = ۸\times۱۰^{-۳}\,T/s$$

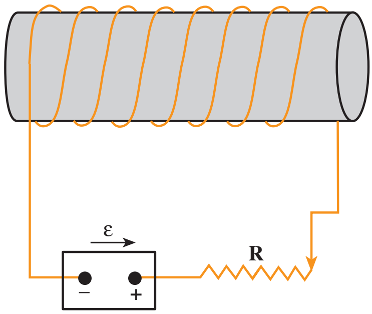
۵ــ۵ــ خودالقایی

در آزمایش‌ها و فعالیت‌هایی که از ابتدای این فصل تا این‌جا انجام داده‌اید، همواره یک عامل خارجی باعث تغییر شار مغناطیسی و در نتیجه، القای نیروی محرکه و جریان الکتریکی در مدار شده است. برای مثال در شکل ۵ــ۱۲ تغییر جریان در مدار A باعث تغییر شار مغناطیسی در سیملوله‌ی B و ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در مدار B می‌شود. در ادامه به بررسی این موضوع می‌پردازیم که : تغییر جریان الکتریکی در یک مدار حتی در خود مدار نیروی محرکه‌ای را القا می‌کند. برای این کار مداری مطابق شکل ۵ــ۱۳ در نظر بگیرید.

فرض کنید که رئوستا با بیش‌ترین مقاومت در مدار قرار گرفته است و جریان ثابتی از مدار



شکل ۵ــ۱۲ــ تغییر جریان در سیملوله‌ی A باعث ایجاد جریان در سیملوله‌ی B می‌شود.

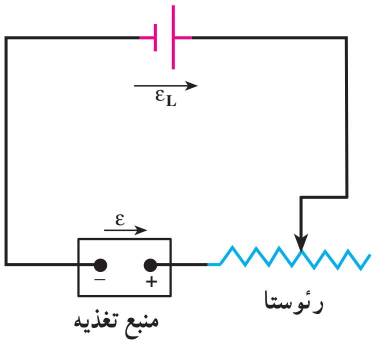


شکل ۵ــ۱۳ــ خودالقایی ــ تغییر جریان در مدار نیروی محرکه‌ای در خود سیملوله القا می‌کند.

می‌گذرد. درنتیجه، شار مغناطیسی ثابت Φ از سیملوله می‌گذرد. حال اگر مقاومت رئوستا را به‌تدریج کاهش دهیم، جریان در سیملوله افزایش می‌یابد. در مدتی که جریان در حال افزایش است، شار مغناطیسی که از سیملوله می‌گذرد افزایش پیدا می‌کند. بنابر قانون فارادی این تغییر شار باعث ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در خود مدار می‌شود. روشن است که در تمام مدتی که جریان ثابتی از مدار می‌گذرد، چون شار مغناطیسی تغییر نمی‌کند نیروی محرکه‌ی القایی وجود ندارد. به این پدیده که تغییر جریان در یک مدار باعث ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در همان مدار می‌شود **خودالقایی** می‌گویند.

در این مثال، جهت این نیروی محرکه‌ی القایی چنان است که می‌خواهد مانع افزایش شار مغناطیسی‌ای شود که منبع تغذیه ایجاد می‌کند. افزایش شار مغناطیسی به‌دلیل افزایش شدت جریانی است که از مدار می‌گذرد، درنتیجه نیروی محرکه‌ی القایی در واقع در جهتی است که با افزایش شدت جریان

مقابله می‌کند. به‌عبارت دیگر در این حالت نیروی محرکه‌ی القایی معادل نیروی محرکه‌ی باتری‌ای عمل می‌کند که در جهت مخالف منبع تغذیه مانند شکل ۵ــ۱۴ در مدار قرار گرفته باشد.



شکل ۵ــ۱۴ــ خودالقایی باعث می‌شود که سیملوله مانند پیل ε در مدار عمل کند.

فعالیت ۵ــ۲

با بحث در گروه خود، نتیجه‌ی آزمایشی را پیش‌بینی کنید که در آن مشابه آزمایش بالا عمل شود؛ با این تفاوت که به‌جای کاهش مقاومت مدار، آن‌را افزایش دهند. دلیل وجود نیروی محرکه‌ی القایی و جهت آن‌را نیز مورد بحث قرار دهید.

به این ترتیب، دریافتیم که :

هرگاه جریانی که از یک سیملوله (یا یک پیچه) می‌گذرد، تغییر کند، در آن نیروی محرکه‌ای به‌وجود می‌آید که با عامل تغییر جریان مخالفت می‌کند و به آن نیروی محرکه‌ی خودالقایی گفته می‌شود. این پدیده را **خودالقایی** می‌نامند.

ضریب خودالقایی (یا القاییدگی): در پدیده‌ی خودالقایی، در اثر عبور یک جریان الکتریکی متغیر از سیملوله، میدان مغناطیسی متغیری به‌وجود می‌آید. بزرگی این میدان در هر لحظه متناسب با جریانی است که در آن لحظه از سیملوله می‌گذرد (به‌عنوان مثال رابطه‌های ۴ــ۷ و ۴ــ۹ را ملاحظه کنید)، یعنی :

$$B \propto I$$

این میدان مغناطیسی متغیر، شار مغناطیسی متغیری را از سیملوله عبور می‌دهد که با میدان مغناطیسی متناسب است و در نتیجه با شدت جریانی که از سیملوله می‌گذرد متناسب است، یعنی

$$\Phi \propto B \quad \Phi \propto I$$

اگر ضریب تناسب را با نماد b نشان دهیم، داریم :

$$\Phi \quad bI$$

این شار مغناطیسی متغیر در هر حلقه‌ی سیملوله (یا پیچه) نیروی محرکه‌ای القا می‌کند که به‌صورت زیر است :

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi}{dt}$$

یا :

$$\varepsilon_1 = -b\frac{dI}{dt}$$

در نتیجه اگر سیملوله دارای N حلقه باشد، نیروی محرکه‌ی القا شده در سیملوله برابر خواهد بود با :

$$\varepsilon_L = N\varepsilon_1$$

$$\varepsilon_L = -Nb\frac{dI}{dt}$$

اگر $Nb = L$ قرار دهیم، نیروی محرکه‌ی خودالقایی سیملوله به‌صورت زیر نوشته می‌شود :

$$\varepsilon_L = -L\frac{dI}{dt} \qquad (۵ــ۵)$$

L از مشخصات ساختمانی سیملوله است (به تعداد حلقه‌ها، طول سیملوله و... بستگی دارد) و **ضریب خودالقایی یا القاییدگی** سیملوله نام دارد. یکای خودالقایی «هانری» نام دارد که آن‌را با نماد H نمایش می‌دهند. **یک هانری ضریب خودالقایی سیملوله‌ای است که هرگاه جریانی که از آن عبور می‌کند با آهنگ یک آمپر بر ثانیه تغییر کند، نیروی محرکه‌ای برابر یک ولت در آن القا شود.**

به هر قسمتی از یک مدار که خاصیت خودالقایی داشته باشد، القاگر می‌گویند. پیچه و سیملوله در مداری با جریان متغیر القاگرند.

مثال ۵ــ۷

از سیملوله‌ای به ضریب خودالقایی $۰/۴H$، جریان متغیری می‌گذرد که با زمان به‌صورت $I = ۴t - ۳$ تغییر می‌کند (I برحسب آمپر و t برحسب ثانیه است). بزرگی نیروی محرکه‌ی القا شده را محاسبه کنید.

حل: داریم

$$|\varepsilon| = \left| L\frac{dI}{dt} \right|$$

$\frac{dI}{dt}$ را از رابطه‌ی جریان برحسب زمان که در مسئله داده شده محاسبه می‌کنیم.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt}(۴t - ۳) = ۴ \ \ A/s$$

در نتیجه، به‌دست می‌آوریم

$$|\varepsilon| = ۰/۴ \times ۴ = ۱/۶ \ \ V$$

محاسبه‌ی ضریب خودالقایی سیملوله: در فصل ۴ دیدیم که میدان مغناطیسی حاصل از عبور جریانی به شدت I از سیملوله‌ای به طول l که دارای N حلقه است، در داخل سیملوله یکنواخت و موازی با محور سیملوله است و از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$B = \mu_{\circ}\frac{NI}{l}$$

علاوه بر این دیدیم که اگر سیملوله دارای هسته‌ای باشد، میدان مغناطیسی سیملوله تقویت می‌شود. میدان مغناطیسی سیملوله‌ای که هسته داشته باشد، در داخل سیملوله از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$B = k\mu_{\circ}\frac{N}{l}I \qquad (۵_۶)$$

که در آن k ضریبی است که به جنس هسته‌ی داخل سیملوله بستگی دارد و به آن **تراوایی نسبی مغناطیسی هسته** می‌گویند. با توجه به آن‌که میدان مغناطیسی در داخل سیملوله یکنواخت و موازی با محور سیملوله است، شار مغناطیسی حاصل از آن که از سیملوله می‌گذرد برابر است با :

$$\Phi = AB = k\mu_{\circ}\frac{NA}{l}I \qquad (۵_۷)$$

نیروی محرکه‌ی خودالقایی برابر است با :

$$\varepsilon_L = -N\frac{d\Phi}{dt} \qquad (۵_۸)$$

با قرار دادن Φ از رابطه‌ی ۵ ــ ۷ در رابطه‌ی ۵ ــ ۸ به‌دست می‌آوریم :

$$\varepsilon_L = N\frac{d}{dt}(k\mu_\circ \frac{NA}{l} I)$$

یعنی :

$$\varepsilon_L = k\mu_\circ \frac{N^۲A}{l}\frac{dI}{dt} \qquad (۵_۹)$$

از مقایسه‌ی رابطه‌های ۵ ــ ۵ و ۵ ــ ۹ به‌دست می‌آوریم :

$$L = k\mu_\circ \frac{N^۲A}{l} \qquad (۵_۱۰)$$

این رابطه نشان می‌دهد که ضریب خودالقایی از مشخصه‌های ساختاری القاگر است و به‌جریان متغیری که از القاگر می‌گذرد بستگی ندارد.

مثال ۵ـ۸

سیملوله‌ای بدون هسته، با سطح مقطع $۱۰cm^۲$ و طول ۵۰cm در نظر بگیرید.
اگر تعداد حلقه‌های این سیملوله برابر ۲۰۰۰ باشد، ضریب خودالقایی آن را حساب کنید.

حل: چون سیملوله بدون هسته است، $k = ۱$ است بنابراین با استفاده از رابطه‌ی ۵ ــ ۱۰ داریم :

$$L = ۱ \times ۴\pi \times ۱۰^{-۷} \times \frac{(۲۰۰۰)^۲ \times (۱۰ \times ۱۰^{-۴})}{۰/۵}$$

در نتیجه :

$$L = ۱۰^{-۲}H = ۱۰mH$$

تمرین ۵ـ۴

دو سیملوله با سطح مقطع و تعداد دور یکسان درنظر بگیرید. اگر طول یکی از سیملوله‌ها دو برابر دیگری باشد، نسبت ضریب خودالقایی آن‌ها را محاسبه کنید.

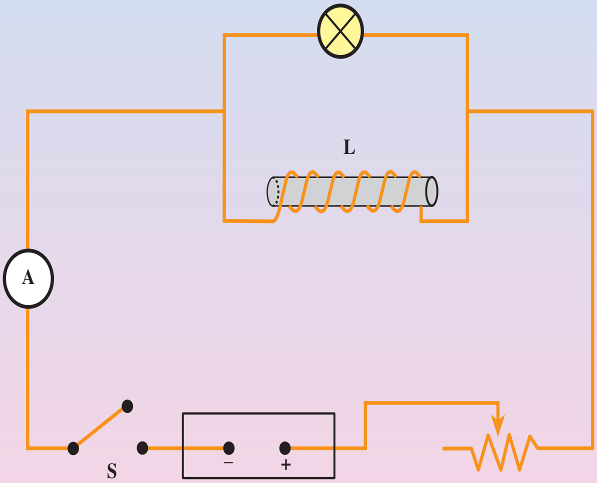
آزمایش ۵ـ۲

وسیله‌های آزمایش: لامپ ۱۲ ولتی، منبع تغذیه، رئوستا، کلید، سیم رابط، سیملوله (با ۲۰۰ تا ۴۰۰ دور) و هسته‌ی آهنی.

۱ــ مداری مطابق شکل ۵ ــ ۱۵ ببندید.

۲ــ رئوستا را به‌گونه‌ای تنظیم کنید تا لامپ با روشنایی ضعیف تابش کند.

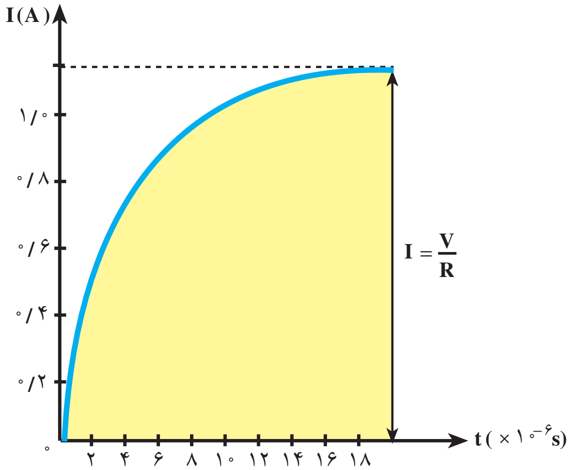
۳ــ کلید S را سریعاً قطع کنید و آن‌چه را مشاهده می‌کنید پس از بحث در گروه به کلاس گزارش کنید.



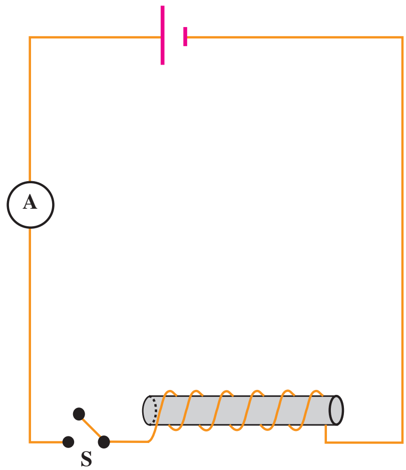
شکل ۵ ــ ۱۵

دیدیم که تغییر جریان در یک القاگر باعث ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در آن می‌شود. ایجاد نیروی محرکه القایی باعث می‌شود جریان به سرعت به مقدار نهایی خود نرسد. برای مثال مداری مانند شکل ۵ ــ ۱۶ الف در نظر بگیرید که در آن یک سیملوله با تعداد دور نسبتاً زیاد به دو سر یک باتری بسته شده است. هنگامی که کلید S را می‌بندیم، جریان به‌طور آنی به مقداری که از قانون اهم $(I = \frac{V}{R})$ به‌دست می‌آید نمی‌رسد، بلکه با زمان تغییر می‌کند. منحنی تغییر جریان با زمان به‌صورت منحنی شکل ۵ــ۱۶ب است.

این اثر را می‌توانیم به این صورت توجیه کنیم که به هنگام بستن کلید، جریان از صفر روبه



(ب) چگونگی تغییر جریان با زمان به هنگام بستن کلید



(الف) سیمی به مقاومت R را به‌صورت یک سیملوله بسته‌ایم

شکل ۵ــ۱۶ــ اثر خودالقایی در مدار شامل سیملوله (اعداد روی شکل مربوط به یک آزمایش خاص است)

افزایش می‌گذارد و نیروی محرکه‌ی خودالقایی در جهت مخالف نیروی محرکه‌ی مولد در سیملوله القا می‌شود، در نتیجه جریان در مدار کم‌تر از حالتی است که خودالقا در مدار وجود نداشته باشد. یعنی جریان کم‌تر از مقداری است که از رابطه‌ی $I=\frac{V}{R}$ به‌دست می‌آید. با گذشت زمان و نزدیک شدن جریان به I، آهنگ تغییر جریان کندتر می‌شود. بنابراین نیروی محرکه‌ی خودالقایی نیز کوچک‌تر می‌شود. هنگامی که جریان برابر I می‌شود، دیگر جریان تغییر نمی‌کند و نیروی محرکه‌ی خودالقایی به صفر می‌رسد.

فعالیت ۵ ــ ۳

با توجه به مطالب بالا نتیجه‌ی آزمایش ۵ ــ ۲ را توجیه کنید.

۵ ــ ۶ ــ انرژی ذخیره شده در القاگر

هنگامی‌که در دو سر القاگری اختلاف پتانسیل برقرار شود، از طرف مولد به القاگر انرژی داده می‌شود. بخشی از این انرژی در مقاومت R تلف می‌شود و بقیه‌ی آن در میدان مغناطیسی سیملوله ذخیره می‌شود، این انرژی از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$U=\frac{1}{2}LI^2 \qquad (۵ــ۱۱)$$

این انرژی در میدان مغناطیسی حاصل از عبور جریان از القاگر ذخیره می‌شود.

مثال ۵ـ۹

سیملوله‌ای با ضریب خودالقایی $0/4\mathrm{H}$ و مقاومت 100Ω مفروض است.
سیملوله را مطابق شکل ۵ ــ ۱۵ به یک باتری ۶ ولتی وصل می‌کنیم. چه مقدار انرژی در سیملوله ذخیره می‌شود؟

حل: پس از آنکه جریان در سیملوله به مقدار نهایی خود رسید، داریم :

$$I = \frac{V}{R} = \frac{6}{100} = 0/06\mathrm{A}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۵ ــ ۱۱ انرژی ذخیره شده در القاگر برابر است با :

$$U = \frac{1}{2}LI^2$$

$$= \frac{1}{2}(0/4)(0/06)^2 = 7/2 \times 10^{-4}\mathrm{J}$$

تمرین ۵ـ۵

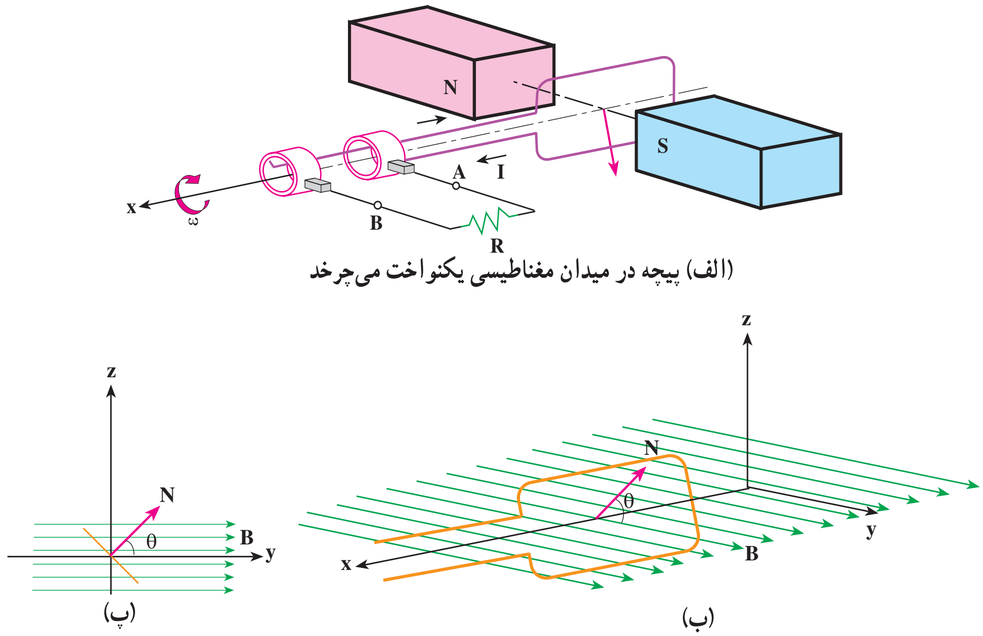
رابطه‌ای برای انرژی ذخیره شده در یک سیملوله‌ی بدون هسته بر حسب ویژگی‌های سیملوله به‌دست آورید.

۵ ــ۷ــ جریان متناوب

یکی از کاربست‌های مهم القای الکترومغناطیسی، تولید جریان متناوب است. دیدیم که برای ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی باید شار عبوری از مدار تغییر کند، و شار مغناطیسی‌ای که از یک پیچه می‌گذرد از رابطه‌ی $\Phi \quad AB\cos\theta$ محاسبه می‌شود، که در آن θ زاویه‌ی بین نیم‌خط عمود بر سطح پیچه و میدان مغناطیسی است.

ساده‌ترین راه برای تغییر شار، تغییر زاویه‌ی θ است. به همین لحاظ متداول‌ترین روش تولید جریان القایی، تغییر زاویه‌ی θ است.

شکل ۵ ــ۱۷ الف پیچه‌ای را نشان می‌دهد که می‌تواند در میدان مغناطیسی یکنواخت حول محور x دوران کند. محور y را منطبق بر راستای میدان مغناطیسی انتخاب کرده‌ایم، شکل‌های ۵ــ۱۷ ب و پ نشان می‌دهند که چگونه زاویه‌ی θ، با چرخش پیچه حول محور x، تغییر می‌کند.



شکل ۵ـ۱۷

اگر زمان یک دور چرخش پیچه T ثانیه باشد، پیچه در مدت t ثانیه $\frac{t}{T}$ دور خواهد چرخید. هر دور کامل برابر 2π رادیان است. در نتیجه اگر پیچه در لحظه‌ی $t=0$ در وضعیت عمود بر میدان مغناطیسی $(\theta=0)$ باشد، پس از گذشت t ثانیه در وضعیت زیر خواهد بود :

$$\theta = 2\pi\frac{t}{T} \text{ رادیان} \qquad (۵\text{ـ}۱۲)$$

T یعنی زمان چرخش یک دور کامل را «**دوره**» یا «**زمان تناوب**» می‌نامند. $\frac{2\pi}{T}$ را با ω نمایش می‌دهند و به آن بسامد زاویه‌ای می‌گویند. در نتیجه داریم :

$$\theta = \omega t$$

در نتیجه شار مغناطیسی $\Phi \quad AB\cos\theta$ که در لحظه‌ی t از پیچه عبور می‌کند برابر است با :

$$\Phi \quad AB\cos\omega t \qquad (۵\text{ـ}۱۳)$$

نیروی محرکه‌ی القا شده در پیچه با توجه به قانون فارادی از رابطه‌ی ۵ـ۳ محاسبه می‌شود

$$\varepsilon = - N\frac{d\Phi}{dt} = -NAB\frac{d(\cos\omega t)}{dt}$$

و یا

$$\varepsilon \quad NAB\omega \ \sin\omega t \qquad (۵\text{ـ}۱۴)$$

یعنی نیروی محرکه‌ای که در پیچه القا می‌شود با زمان تغییر می‌کند. بیش‌ترین مقدار این نیروی محرکه مربوط به زمانی است که برای آن $\sin \omega t = 1$ باشد و برابر است با $\varepsilon_m = NAB\omega$. در نتیجه می‌توانیم بنویسیم :

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t \qquad (۱۵ــ۵)$$

این رابطه نشان می‌دهد که نیروی محرکه‌ی القا شده به‌طور دوره‌ای تغییر می‌کند.

تمرین ۵ــ۶

(الف) نمودار تغییرات شاری که از مدار پیچه در شکل ۵ ــ ۱۷ الف می‌گذرد را بر حسب زمان در طول یک دوره‌ی چرخش پیچه رسم کنید.

(ب) نمودار تغییرات نیروی محرکه‌ی القا شده در پیچه در شکل ۵ ــ ۱۷ الف را بر حسب زمان در طول یک دوره‌ی چرخش پیچه رسم کنید.

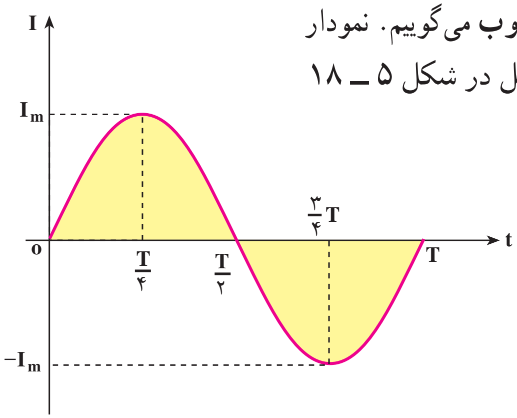
اگر مقاومت مدار برابر R باشد، جریان حاصل از این نیروی محرکه از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_m}{R} \sin \omega t \qquad (۱۶ ــ ۵)$$

این رابطه نشان می‌دهد که جریان نیز با زمان تغییر می‌کند. بیش‌ترین مقدار جریانی که از مدار می‌گذرد، مربوط به زمانی است که $\sin \omega t = 1$ باشد، و برابر است با $I_m = \frac{\varepsilon_m}{R}$. در نتیجه می‌توانیم بنویسیم

$$I = I_m \sin \omega t \qquad (۱۷ــ۵)$$

رابطه‌ی ۵ ــ۱۷ نشان می‌دهد که جریان الکتریکی تولید شده در مدار پیچه به‌طور سینوسی تغییر می‌کند. به یک چنین جریانی، **جریان متناوب** می‌گوییم. نمودار تغییرات جریان متناوب در یک دوره‌ی کامل در شکل ۵ ــ ۱۸ رسم شده است.



شکل ۵ــ۱۸ــ نمودار تغییرات جریان متناوب سینوسی در یک دوره

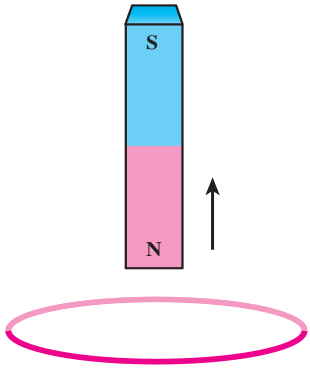
فعالیت ۵ ــ ۴

با بحث در گروه خود و با استفاده از نمودار شکل ۵ ــ ۱۸ جهت جریان متناوب را در هر بازه‌ی زمانی برابر $\frac{۱}{۴}$ دوره مورد بررسی قرار دهید، و نتیجه را به کلاس گزارش کنید.

در صنعت برای ایجاد جریان متناوب از مولدهای مخصوصی استفاده می‌شود که به آن‌ها «**مولدهای صنعتی جریان متناوب**» گفته می‌شود. در مولدهای صنعتی، پیچه‌ها را ساکن گرفته و آهنربا را در مقابل آن‌ها می‌چرخانند.

تمرین‌های فصل پنجم

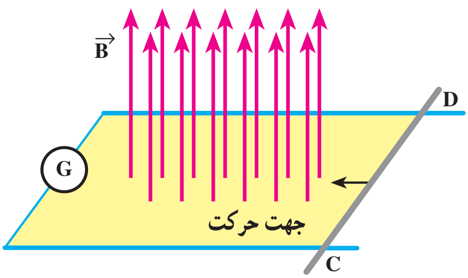
۱ــ قطب شمال یک آهنربا، مطابق شکل ۵ ــ ۱۹ از یک حلقه‌ی فلزی دور می‌شود. جهت جریان القایی را در حلقه مشخص کنید.



شکل ۵ ــ ۱۹

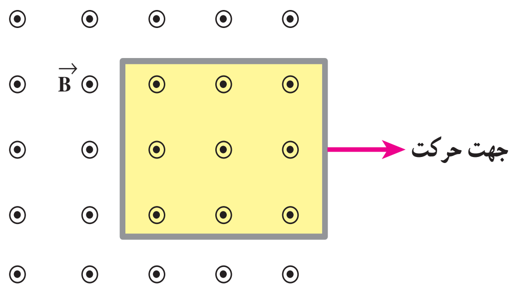
۲ــ یک آهنربای میله‌ای را به‌طور قائم از ارتفاع معینی نزدیک زمین رها می‌کنیم. اگر سطح زمین در محل برخورد آهنربا با آن نرم باشد آهنربا در زمین فرو می‌رود. اگر این آزمایش را بار دیگر در وضعیتی تکرار کنیم که آهنربا در حین سقوط از درون حلقه‌های یک پیچه بگذرد، مقدار فرورفتگی آهنربا در زمین چه تغییری خواهد کرد؟ چرا؟ (از اثر مغناطیسی زمین بر روی آهنربا چشم‌پوشی کنید.)

۳ــ دو میله‌ی رسانای موازی در صفحه‌ای عمود بر میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ قرار دارند. این میله‌ها توسط گالوانومتری مطابق شکل ۵ ــ ۲۰ به یک‌دیگر بسته شده‌اند. میله‌ی رسانای CD می‌تواند روی دو میله‌ی موازی بلغزد. اگر میله‌ی CD در جهت نشان داده شده در شکل به حرکت درآید جهت جریان القایی در مدار در چه سویی است؟



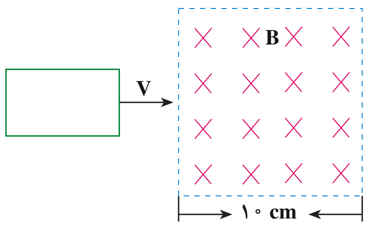
شکل ۵ ــ ۲۰

۴ ــ پیچه‌ی مستطیلی را که شکل ۵ ــ۲۱ نشان داده شده است به‌طرف راست می‌کشیم و از میدان مغناطیسی برونسو خارج می‌کنیم. جهت جریان القایی در پیچه در چه سویی است؟



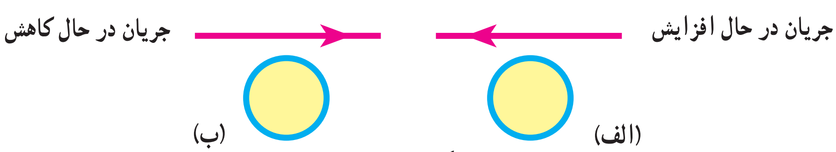
شکل ۵ ــ۲۱

۵ ــ حلقه‌ی فلزی مستطیلی شکلی به ابعاد $۳cm \times ۵cm$ مطابق شکل ۵ ــ۲۲ با سرعت ثابت $۲m/s$ وارد میدان مغناطیسی یکنواخت $۰/۰۲T$ می‌شود و از طرف دیگر آن خارج می‌شود. نمودار تغییرات شاری که از حلقه می‌گذرد و نیروی محرکه‌ی القا شده در آن را بر حسب زمان رسم کنید.



شکل ۵ ــ۲۲

۶ــ جهت جریان القایی در هر یک از حلقه‌های دایره‌ای نشان داده شده در شکل ۵ ــ۲۳ در چه سویی است؟



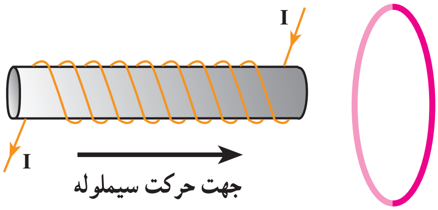
شکل ۵ ــ۲۳

۷ ــ پیچه‌ای که دارای ۱۰۰۰ حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که اندازه‌ی آن $0/04\,T$ و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت $0/01s$ تغییر کرده و به $0/04\,T$ در خلاف جهت اولیه می‌رسد. اگر سطح هر حلقه‌ی پیچه $50cm^2$ باشد،

الف ــ اندازه‌ی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط در پیچه را حساب کنید.

ب ــ جهت جریان القایی را تعیین کنید.

۸ــ در شکل ۵ ــ۲۴ اگر سیملوله را در جهت نشان داده شده در شکل به حلقه نزدیک کنیم جریان القایی در حلقه در چه جهتی است؟



شکل ۵ ــ۲۴

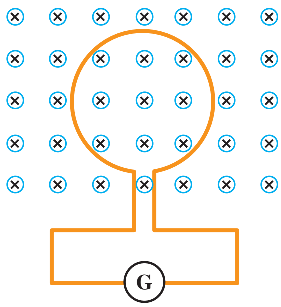
۹ــ پیچه‌ای با سطح مقطع $30cm^2$ دارای ۱۰۰۰ حلقه است و در ابتدا بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت $0/02s$ پیچه بچرخد و موازی میدان مغناطیسی زمین قرار بگیرد، نیروی محرکه‌ی متوسط القایی در آن چه‌قدر است؟ اندازه‌ی میدان زمین را $0/5G$ در نظر بگیرید.

۱۰ــ اگر شار مغناطیسی عبوری از حلقه‌ای مطابق رابطه‌ی زیر (در SI) تغییر کند :

$$\Phi_B = (4t^2 + 3t - 1) \times 10^{-3}$$

بزرگی نیروی محرکه‌ی القایی در حلقه در لحظه‌ی $t = 2s$ چه‌قدر است؟

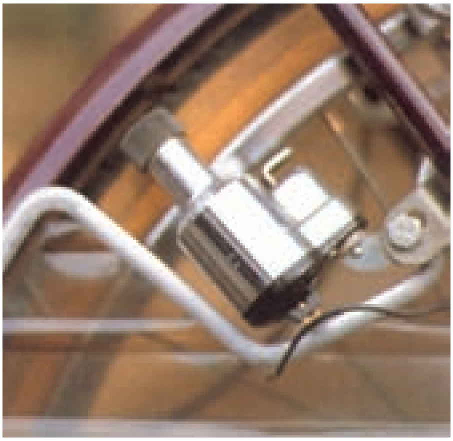
۱۱ــ حلقه‌ای مطابق شکل ۵ ــ۲۵ درون یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد. اگر اندازه‌ی میدان افزایش یابد، جهت جریان القایی را روی حلقه مشخص کنید.



شکل ۵ ــ ۲۵

۱۲ــ جریان متناوبی که بیشینه‌ی آن $2A$ و دوره‌ی آن $0/02s$ است از یک رسانای ۵ اهمی می‌گذرد. (الف) در چه لحظه‌هایی شدت جریان بیشینه خواهد بود؟ در این لحظه‌ها نیروی محرکه‌ی القایی چه‌قدر است؟ (ب) در لحظه‌ی $t = \frac{1}{400} s$ ، شدت جریان چه‌قدر است؟

۱۳ــ شکل ۵ ــ۲۶ دینام یک دوچرخه را نشان می‌دهد، تحقیق کنید چگونه این دینام، برق مورد نیاز لامپ‌های دوچرخه را تولید می‌کند.



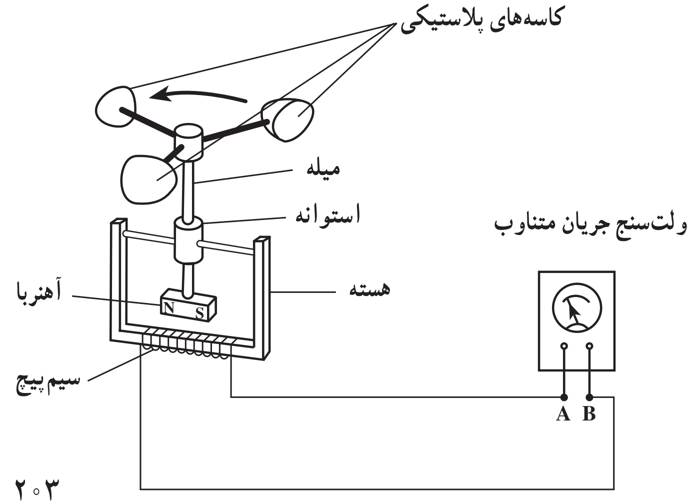
شکل ۵ ــ ۲۶ــ دینام دوچرخه

۱۴ ــ شکل ۵ ــ۲۷ ساختمان یک بادسنج را نشان می‌دهد. اگر این بادسنج را روی بام خانه نصب کنیم، به هنگام وزیدن باد میله‌ی آن می‌چرخد و ولت‌سنج عددی را نشان می‌دهد.

الف) چرا چرخش میله سبب انحراف عقربه‌ی ولت‌سنج می‌شود؟

ب) آیا با افزایش سرعت باد، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ چرا؟

پ) برای بهبود و افزایش دقت کاردستگاه دو پیشنهاد ارائه دهید.



شکل ۵ ــ ۲۷

واژه‌نامه‌ی فارسی ـ انگلیسی

Adiabatic Process	فرآیند بی‌دررو
Alternating Current	جریان متناوب
Angular frequency	بسامد زاویه‌ای
Attraction	ربایش
Bar magnet	آهنربای میله‌ای
Boiler	دیگ بخار
Capacitance	ظرفیت
Condenser	چگالنده
Coefficient of performance	ضریب عملکرد
Coefficient of resistivity	ضریب دمایی مقاومت ویژه
Coil	پیچه
Cold reservoir	منبع سرد
Compression (step)	(مرحله‌ی) تراکم
Capacitor	خازن
Conservation of charge	پایستگی بار
Cosmic ray	پرتو کیهانی
Coulomb's Law	قانون کولن
Cycle	چرخه
Deviation Angle	زاویه‌ی انحراف
Dielectric breakdown	فروشکست دی‌الکتریک
Dielectric constant	ثابت دی‌الکتریک
Efficiency	بازده
Environment	محیط
Electric dipole	دوقطبی الکتریکی
Electric field lines	خط‌های میدان الکتریکی
Electric field	میدان الکتریکی
Electric force	نیروی الکتریکی
Electric Motor	موتور الکتریکی
Electric potential energy	انرژی پتانسیل الکتریکی
Electric resistance	مقاومت الکتریکی
Electro Motive Force (E.M.F.)	نیروی محرکه الکتریکی
Electromagnetic induction	القای الکترومغناطیسی
Electric current	جریان الکتریکی
Equation of state	معادله‌ی حالت
Equilibrium	تعادل
Equivalent resistance	مقاومت معادل

Exhaust (step)	(مرحله‌ی) تخلیه
Expansion	انبساط
Explosion (step)	(مرحله‌ی) آتش گرفتن
External combustion engine	ماشین برون‌سوز
Faraday's law of electromagnetic induction	قانون القای الکترومغناطیسی فاراده
Ferromagnetism	فرومغناطیس
First law of Thermodynamics	قانون اول ترمودینامیک
Gas Constant	ثابت گازها
Heat engine	ماشین گرمایی
Heat reservoir	منبع گرما
Heat	گرما
Horseshoe magnet	آهنربای نعلی‌شکل
Hot reservoir	منبع گرم
Ideal gas	گاز کامل
Inclination Angle	زاویه‌ی میل
Induced current	جریان القایی
Inductance	ضریب خودالقایی (القاییدگی)
Inductor	القاگر
Insulator	عایق
Intake (step)	(مرحله) مکش
Internal combustion engine	ماشین درون‌سوز
Internal energy	انرژی درونی
Internal resistance	مقاومت درونی
Iron Core	هسته‌ی آهنی
Isobaric Process	فرآیند هم‌فشار
Isochoric Process	فرآیند هم‌حجم
Isothermal Process	فرآیند هم‌دما
Kirochhoff's laws	قانون‌های کیرشهف
Lenz's law	قانون لنز
Loop	حلقه
Macroscopic quantities	کمیت‌های ماکرسکوپیک
Magnetic axis	محور مغناطیسی
Magnetic dipole	دوقطبی مغناطیسی
Magnetic Domain	حوزه‌ی مغناطیسی
Magnetic Energy	انرژی مغناطیسی
Magnetic field lines	خط‌های میدان مغناطیسی
Magnetic field	میدان مغناطیسی
Magnetic flux	شار مغناطیسی
Magnetic induction	القای مغناطیسی
Magnetic permeability	تراوایی مغناطیسی
Mechanism	سازوکار
Microscopic quantities	کمیت‌های میکروسکوپیک
Molar Heat Capacity	ظرفیت گرمایی مولی
Net charge	بار خالص
Node	گره
North pole	قطب شمال
Parallel Circuits	مدارهای موازی
Parallel plate capacitor	خازن تخت (خازن با صفحه‌های موازی)
Paramagnetism	پارامغناطیس
Permanent magnet	آهنربای دایمی
Permitivity	ضریب گذردهی

Polarized قطبیده

Potential difference اختلاف پتانسیل

Power (step) (مرحله‌ی) انجام کار

Pressure فشار

Refrigerator یخچال

Relative magnetic Permeability تراوایی نسبی مغناطیسی

Repulsion رانش

Resistivity مقاومت ویژه

Resistor مقاومت

Rheostat رئوستا

Right hand rule قاعده‌ی دست راست

Second law of Thermodynamics قانون دوم ترمودینامیک

Self - induction خودالقایی

Series Circuits مدارهای متوالی

Solenoid سیملوله

South pole قطب جنوب

Steam engine ماشین بخار

Surface charge density چگالی سطحی بار

System دستگاه

Temperature دما

Temporary magnet آهنربای موقّت

Thermal equilibrium تعادل گرمایی

Thermodynamic Process فرآیند ترمودینامیکی

Thermodynamic Variabels متغیرهای ترمودینامیکی

Thermodynamics ترمودینامیک

to charge پرکردن (خازن)

to discharge خالی کردن (خازن)

Valve دریچه (سوپاپ)

Variable resistor مقاومت متغیر

Voltage drop افت پتانسیل

Volume حجم

فهرست مراجع

۱ــ مجلات رشد آموزش فیزیک

۲ــ اصول فیزیک جلد ۱ و ۲ هانس. سی. اوهانیان، مرکز نشر دانشگاهی

۳ــ دوره‌ی درسی فیزیک جلد ۱ تا ۴ گ. س. لندسبرگ، ترجمه دکتر لطیف کاشیگر ، ناصر مقبلی، انتشارات فاطمی.

4 ـ Physics Raymond A. Serway Jerry S. Faughn 1999 by Holt Rinehart and Winston.

5 ـ Physics For Scientists and Engineers Paul A. Tipler 1999 by W. H. Freedman and Company.

6 ـ College Physics Raymond A. Serway Jerry S. Faughn 1999, 2000, SAUNERS College Publishing.

7 ـ Fundamentals of Physics.
David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker 2001 John Wiley & Sons, Inc.

8 ـ Physics. Principles with Applications Douglas C. Gioncoli 1991 Prentice - Hall International Editions.

9 ـ Understanding Physics Robin Millar 1994 Collins Educational.

10 ـ Physics Classical and Modern, Frederick J. Keller W. Edward Gettys, Malcolm J. Skove 1993 Mc Graw Hill.

11 ـ UniversityPhysics, Hugh D. Young, Roger A. Freedman, 2000 Addison Wesley Longman, Inc.

12 _ Contemporary College Physics. Jones / Childers 1999 by Mc Graw Hill Companies.

13 _ Physics 2 David Sanq 2001 Cambridge University Press.

14 _ Understanding Physics - Cumnuing Laws Redish Cooney 2004 - Jonh Wiley& Sons.

15 _ Inquiry into Physics - Vern J. Ostdiek - Donald J. Bord 2000 - Thomson Books/ cole.

معلمان محترم، صاحب نظران، دانش آموزان عزیز و اولیای آنان می توانند نظر اصلاحی خود را درباره‌ی مطالب این کتاب از طریق نامه به نشانی تهران - صندوق پستی ۳۶۳ ۱۵۸۵۵ - گروه درسی مربوط و یا پیام نگار (Email) talif@talif.sch.ir ارسال نمایند.

دفتر برنامه ریزی و تألیف کتاب های درسی